



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
ต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัว

โดย

นางสาวอรกช เชาวโพธิ์ทอง
เลขประจำตัวนิสิต 5932740223

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมใน
คอลัมน์ทรายอิมตัว

นางสาวอรกช เชาวโพธิ์ทอง

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT OF ZINC AND
CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN

MISS ORAKOD CHAOPOTONG

A REPORT SUBMITTED IN PARTIALFULFILLMENT OF REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF THE BACHELOR OF SCIENCE IN GEOLOGY DEPARTMENT OF
GEOLOGY, FACULTY OF SCIENCE, CHULALONGKORN UNIVERSITY

ACADEMIC 2019

เรื่อง ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์
ทรายอิมิตัว

โดย นางสาวอรกช เชาวโพธิ์ทอง

สาขาวิชา ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

วันที่ส่ง/...../.....

วันที่อนุมัติ/...../.....

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

Project Title IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT OF ZINC AND
 CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN

By Miss Orakod Chaopotong

Field of Study Geology

Advisor Assoc. Prof. Dr. Srilert Chopantarat

Submitted date/...../.....

Approval date/...../.....

.....

(Assoc. Prof. Dr. Srilert Chopantarat)

Project Advisor

อรกช เขาวีโพธิ์ทอง : ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิ่มตัว (IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT OF ZINC AND CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ , 46 หน้า

การวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมโดยทดลองในคอลัมน์ทรายอิ่มตัว โดยสังกะสีและแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดยอนุภาคคอลลอยด์จะถูกนำเข้าสู่คอลัมน์ทรายอิ่มตัวซึ่งจำลองภายใต้การไหลของชั้นน้ำบาดาลมีแรงดัน โดยได้ทำการทดลอง 3 คอลัมน์ประกอบด้วย 2 คอลัมน์ของสังกะสีที่ค่าพีเอช 3 และ 6 และ 1 คอลัมน์ของสังกะสีและแคดเมียมที่ค่าพีเอช 6 โดยคอลัมน์ของสังกะสีเดี่ยวใช้ความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร และคอลัมน์ของโลหะผสมใช้สารละลายแคดเมียม (5 มิลลิกรัม/ลิตร) และสังกะสี (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร สารละลายที่มีค่าพีเอชต่างกัน จะถูกสูบเข้าคอลัมน์จากด้านล่างสู่ด้านบนด้วยความเร็วคงที่ เท่ากับ 0.159 เซนติเมตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น จากพีเอช 3 เป็น 6 ทำให้ค่าคงที่ของฟรอนด์ริช (Freundlich constants, K_F) ที่เพิ่มขึ้นจาก 3.42 เป็น 3.48 สำหรับ Equilibrium model และ 2.46 เป็น 3.01 สำหรับ Nonequilibrium model ดังนั้นการเคลื่อนตัวของสังกะสีจะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น 3 เป็น 6 ในทางกลับกันค่า Retardation factor (Rf) ที่เพิ่มจาก 8.85% เป็น 38.69% เมื่อพีเอชเพิ่มจาก 3 เป็น 6 ตามลำดับ การดูดซับของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ที่ผสมกันพบว่าต่ำกว่าคอลัมน์ที่มีสังกะสีเพียงตัวเดียว โดยค่า K_F ของทั้งสังกะสีลดลงจาก 3.01 เป็น 2.62 และแคดเมียมลดลงจาก 3.14 เป็น 2.32 เนื่องจากในสารละลายมีธาตุโลหะที่เป็นประจุบวกเท่ากัน 2 ชนิด และเกิดการแย่งการถูกดูดซับโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ดังนั้นมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์จึงช่วยส่งเสริมการเคลื่อนที่ของสังกะสีและแคดเมียมเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะแต่ละชนิดอย่างเห็นได้ชัดเจน

5932740223: MAJOR GEOLOGY

KEYWORD : MONTMORILLONITE COLLOID / ZINC / CADMIUM / GROUNDWATER / ZINC
TRANSPORT / HEAVY METAL TRANSPORT / PH

**ORAKOD CHAOPOTONG : IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT
OF ZINC AND CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN**

ADVISORS : ASSOC. PROF. DR. SRILERT CHOTPANTARAT , 46 pp.

This study investigated the impacts of pH on co-transport of zinc (Zn), cadmium (Cd) and montmorillonite colloids through water-saturated sand column. The Zn-bearing montmorillonites and Zn-Cd-bearing montmorillonites were injected through the column containing saturated sand, which was simulated as a groundwater flowing under a pressure aquifer. There are three column experiments consisting of two columns of Zn at pH 3 and 6, as well as one binary metal (Zn and Cd) column at pH 6. The single metal column used 10 ppm of Zn and binary metal column experiment used mixed solution of Cd (5 ppm) and Zn (5 ppm) with 100 ppm of montmorillonite colloids. The solutions of different pH conditions were pumped to the column in upward mode at a constant velocity of 0.159 cm/min. According to column experiments, as the pH value increases from 3 to 6, it causes an increase of Freundlich constants (K_F) from 3.42 to 3.48 for the equilibrium model (Eq), and increase from 2.46 to 3.01 for the two-site model (TSM). The migration of Zn is decreased with increasing pH from pH 3 to pH 6. In other words, the retardation factor (Rf) increased from 8.85% to 38.69% when the pH increased from 3 to 6. Adsorption of mixed Zn and Cd at pH 6 appeared to be lower than those of the single heavy metal columns. For Zn, K_F decreased from 3.01 to 2.62, while K_F of Cd decreased from 3.14 to 2.32. Thus, the montmorillonite colloids facilitates the migration of Zn and Cd in the mixed system faster than those of each individual Zn and Cd.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ซึ่งกรุณาสละเวลาให้ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในด้านวิชาการคุณธรรม รวมถึงประสบการณ์ต่างๆ และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลา 4 ปี ในรั้วมหาวิทยาลัยแห่งนี้

ขอขอบพระคุณพี่จิระประภา เนียมปาน พี่บรรจง พวงทอง และพี่บุศลากรภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนางสาวฉันทนา อินทิม (พี่ปู) และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนางสาวสาธิตา บุญแก้ววรรณ (พี่มิ่งค์) นางสาวนันท์ชพร อุดมศร (พี่หญิง) และ นางสาวกัญชลิษา แก้วสระแสน (พี่เป้) ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำทดลอง รวมถึงการให้คำแนะนำตลอดการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่นธรณี 60 ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และกำลังใจ ตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พ่อชัย ป้าอีด ครอบครัวทุกคน และเพื่อนรักวงศ์คำบุ๊ค ผู้เป็นกำลังใจหลักในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และยังคงคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

อรกช เชาวโพธิ์ทอง

ผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	Error! Bookmark not defined.
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 สังกะสี (Zn) และ แคดเมียม (Cd)	3
2.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	3
2.1.3 การดูดซับและการพาโลหะหนักเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์	4
2.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์	6
2.1.5 การดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์	7
2.2 ทฤษฎี	8
2.2.1 ค่า Retardation factor	8

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	10
3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	10
3.2 ออกแบบการทดลองและเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง	10
3.3 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	14
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยโปรแกรม HYDRUS-1D	16
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	18
4.1 ผลต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยต์ในคอลัมน์ทรายอิมมั่วที่ค่าพีเอชต่างๆ	18
4.2 โมเดลของสังกะสีที่เคลื่อนตัวผ่านคอลัมน์ทรายอิมมั่ว โดยโปรแกรม HYDRUS-1D	24
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุปผลการศึกษา	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	34

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตาราง 4.1 สมบัติของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อดูการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ ทรายอิมิตัวสำหรับค่าพีเอช 6 และ 3 ของสารละลาย	18
ตาราง 4.2 ขนาดของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์	19
ตาราง 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นเริ่มต้น ของสังกะสีและแคดเมียมของคอลัมน์ที่ 1-3	19
ตาราง 4.4 Retardation factor ของการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมของคอลัมน์ทรายอิมิตัว ที่พีเอช 3 และ 6	23
ตาราง 4.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Equilibrium (Eq) และ Non-equilibrium (TSM) จากการคำนวณโดยโปรแกรม HYDRUS-1D	27
ตาราง 4.6 ค่า Zeta potential และ ขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์	28

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพแสดงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์	4
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์	4
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมตัว	11
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมตัว	11
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการล้างทรายด้วยเครื่องอัลตราโซนิก	12
รูปที่ 3.4 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์หลังตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง	13
รูปที่ 3.5 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์อบแห้ง	13
รูปที่ 3.6 โปรแกรม HYDRUS-1D	17
รูปที่ 4.1 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสี กับปริมาตรรูพรุนที่ pH 6	20
รูปที่ 4.2 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสี กับปริมาตรรูพรุนที่ pH 3	21
รูปที่ 4.3 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสี (กรณีผสมกับแคดเมียม) กับปริมาตรรูพรุนที่ pH 6	21
รูปที่ 4.4 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของแคดเมียม (กรณีผสมกับสังกะสี) กับปริมาตรรูพรุนที่ pH 6	22
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium model (CD_{eq}) และ Two-site model (TSM) จาก กราฟ Breakthrough ของสังกะสี (a) มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 6 (b) ไม่มี มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 6 (c) มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 3 (d) ไม่มีมอนต์มอริลโล ไนต์คอลลอยด์ที่ pH 3	25

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium model (CD_{eq}) และ Two-site model (TSM) จากกราฟ Breakthrough ของสังกะสีและแคดเมียม (a) สังกะสีประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ที่ pH 6 (b) แคดเมียมประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH	26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

หนึ่งในการปนเปื้อนของสารเคมีในสิ่งแวดล้อมที่อันตรายมากที่สุดคือการปนเปื้อนของโลหะหนัก (Avkopashvili et al., 2015) การปนเปื้อนของโลหะหนักในปริมาณมากเป็นโทษต่อ ดิน ต้นไม้ สัตว์น้ำ และมนุษย์ (Singh, 2011) สังกะสี (Zn) และแคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากในสิ่งแวดล้อมโดยแคดเมียมและสังกะสีมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญในเชิงปริมาณ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2549) สารปนเปื้อนเหล่านี้จะเข้าไปสู่ระบบน้ำบาดาลโดยมนุษย์ และกระบวนการทางธรรมชาติ (Mohankumar et al., 2016) เช่น ผลจากการทำเหมืองแร่ การทำสังกะสี ตะกั่วและแคดเมียมให้บริสุทธิ์ และการเผาขยะ (ATSDR, 2005) สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐ (Environmental Protection Agency) กำหนดให้มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในน้ำดื่ม ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร และแนะนำไม่ควรมีการปนเปื้อนของสังกะสีในระดับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร (USEPA, 2009)

เมื่อโลหะหนักถูกชะล้างจากผิวดินสู่ชั้นใต้ดิน อนุภาคคอลลอยด์จะดูดซับโลหะหนักไว้ โดยสามารถพบอนุภาคคอลลอยด์ได้ทั่วไป ทั้งในดินและชั้นน้ำบาดาล (Sun et al., 2001) อนุภาคคอลลอยด์เป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร (Kretzschmar et al., 1999) ในธรรมชาติมีความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำบาดาลระหว่าง 108 ถึง 1,017 อนุภาคต่อลิตร (Kim, 1991) เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีพื้นผิวค่อนข้างมาก จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดี (Walshe et al., 2010) โดยความเข้มข้นของ สารหนู (As) ในสารละลายในดิน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่ม ขณะที่ความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) มีค่าลดลง ดังนั้นคุณสมบัติของโลหะหนักจึงมีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์ (Lee et al., 2018) โลหะหนักบางส่วนจะถูกอนุภาคคอลลอยด์ดูดซับไว้บริเวณพื้นผิว (McCarthy and McKay, 2004) ดังนั้นโลหะที่ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ มีความเร็วในการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับโลหะหนักในระบบน้ำบาดาลเช่นกัน (McGechan and Lewis, 2002)

จาก การศึกษาของ Bhattacharyya และ Gupta (2008) พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เช่น สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ ดีกว่าแร่เคโอลินไนต์ (Kaolinite) โดยความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของแร่มอนต์มอริลโลไนต์มีค่า 32.7 มิลลิกรัม/กรัม ขณะที่แร่เคโอลิ

ไนต์มีค่าการดูดซับที่ 9.9 มิลลิกรัม/กรัม จากการศึกษาของ Abollino และคณะ (2003) พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และ Humelnicu และคณะ (2015) พบว่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีของแรมมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มจาก 42.44% เป็น 71.67 % โดยค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 6.5 เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zhu และคณะ (2001) พบว่า ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ เพิ่มขึ้นจาก 74 % เป็น 87% โดยค่าพีเอชเพิ่มจาก 3.5 เป็น 6.5 จะเห็นได้ว่า โลหะหนักจะถูกดูดซับได้ดีโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของแร่คือเคมีของน้ำ การทดลองนี้เป็นการทดลองที่คำนึงถึงระบบการไหลของน้ำบาดาลที่อาจส่งผลต่อการเคลื่อนตัวและการดูดซับของสังกะสีและแคดเมียมของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ และการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัว

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัว
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนค่าพีเอชต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสังกะสีและแคดเมียมในมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว

1.3 สมมติฐาน

1. มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีผลต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัว
2. ค่าพีเอชที่ต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสังกะสีและแคดเมียมในมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสังกะสีและแคดเมียมของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบความแตกต่างของการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมเนื่องจากอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่มีผลต่อการดูดซับในระบบที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สังกะสี (Zn) และ แคดเมียม (Cd)

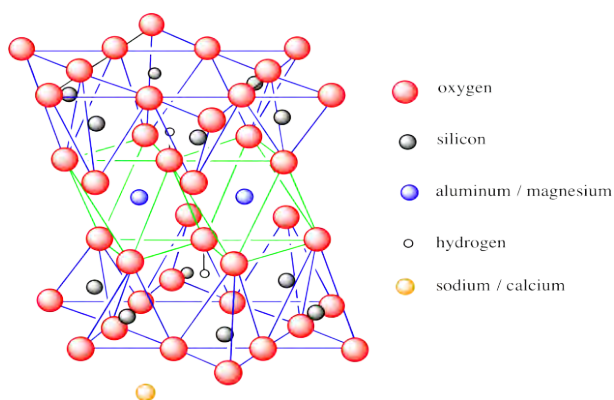
สังกะสี (Zn) และแคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากในสิ่งแวดล้อม โดยแคดเมียมและสังกะสีมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญในเชิงปริมาณ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2549) สารปนเปื้อนเหล่านี้จะเข้าไปสู่ระบบน้ำบาดาลโดยมนุษย์ และกระบวนการทางธรรมชาติ (Mohankumar et al., 2016) เช่น ผลจากการทำเหมืองแร่การทำ สังกะสี ตะกั่วและแคดเมียมให้บริสุทธิ์ และการเผาขยะ สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐ (Environmental Protection Agency) กำหนดให้มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในน้ำดื่ม ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร และแนะนำไม่ควรมีการปนเปื้อนของสังกะสีในระดับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร (USEPA, 2009) หากมีการบริโภคมากเกินไป อาจทำให้อาการต่อไปนี้ เช่น ท้องเสีย คลื่นไส้ อาเจียน (Honestdoc, 2020) นอกจากนี้ แคดเมียม ยังก่อให้เกิดโรคอิตาลีไต โรคกระดูกพรุน และโรคไต (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ, 2012)

2.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดิน (Clay mineral) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญในสิ่งแวดล้อม เพราะเปรียบเหมือนผู้ไล่เก็บมลพิษ โดยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุหรือการดูดซับสิ่งเหล่านั้น โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์เป็นลักษณะแร่ดินซ้อนกัน 3 ชั้น (T-O-T layers) ประกอบด้วย แผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรัล (Alumina Octahedral) ที่อยู่ตรงกลาง 1 แผ่น และประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเทตระฮีดรัล (Silica Tetrahedral) 2 แผ่น มีสูตรทางเคมีคือ $(\text{Si}_{7.8}\text{Al}_{0.2})^{\text{IV}}(\text{Al}_{3.4}\text{Mg}_{0.6})^{\text{VI}}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ จากสูตรทางเคมีชี้ให้เห็นว่า Si^{4+} ถูกแทนที่โดย Al^{3+} ใน ชั้นเทตระฮีดรัล และ Al^{3+} ถูกแทนที่โดย Mg^{2+} ในชั้นออกตะฮีดรัล ดังนั้นประจุสุทธิของมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ -0.8 ต่อหน่วยเซลล์ โดยประจุสุทธิที่เป็นลบ สามารถเกิดสมดุลได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยการดูดซับระหว่างชั้นและมุ่มรอบๆ มอนต์มอริลโลไนต์ การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Exchangeable cation) ในชั้น 2:1 ให้สมดุลกับประจุสุทธิที่เป็นลบเกิดจากการแทนที่ของไอออนที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่มีขนาดประจุต่างกัน (Isomorphic substitution) การแลกเปลี่ยนประจุบวกจะขึ้นกับจลศาสตร์ (Kinetic) แล้ว ยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของโลหะบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย (Bhattacharyya and Gupta, 2008) กลไกการดูดซับโลหะหนักของมอนต์มอริลโลไนต์มี 2 รูปแบบ กลไกแรกคือ การแลกเปลี่ยนประจุบวกที่เกิดขึ้นบนระนาบระหว่างชั้น (Interlayer) ของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอออนและประจุลบถาวร และกลไกที่ 2 คือ การก่อดั้วของสารประกอบเชิงซ้อนภายใน (Inner-

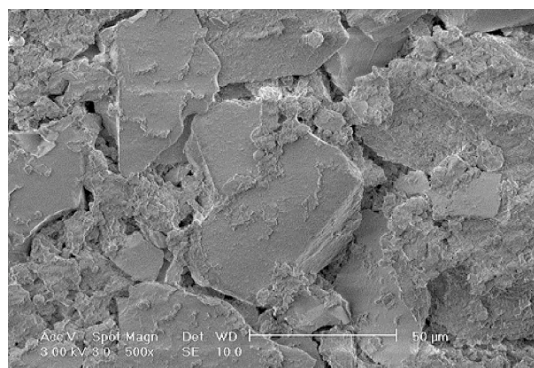
sphere complex) ผ่านกลุ่มซิลิกอนโมโนออกไซด์ (Si-O^-) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al-O^-) ที่บริเวณขอบของอนุภาคแร่ดิน โดยทั้งสองกลไกจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชที่เป็นกรด ($\text{pH}<4$) (Abollino et al., 2003) ทาง Abollino และคณะ (2003) ได้ศึกษาผลของการดูดซับโลหะหนัก 7 ชนิดของโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na-montmorillonite) ได้แก่ แคดเมียม (Cd) , โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และ สังกะสี (Zn) พบว่า การดูดซับโลหะหนักลดลงเมื่อค่าพีเอชลดลง เนื่องจากกลุ่มอะลูมินอล (Aluminol) และ ซิลานอล (Silanol) มีการเติมโปรตอนให้กับอะตอมมาก (Protonation) ดังนั้นจึงเป็นที่สังเกตได้ยาก แต่จะเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับ ทองแดง , ตะกั่ว และ แคดเมียม ซึ่งสาเหตุของพฤติกรรมนี้ คือปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนพื้นผิว ที่ได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ระหว่างประจุของพื้นผิวและไอออนของสารละลาย

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยต่างๆที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักของแร่มอนต์มอริลโลไนต์หรือแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ เช่น การใช้เบนโทไนต์ (Bentonite) ในการกำจัดไอออนของทองแดง สังกะสี และ โคบอลต์ (Kubilay et al., 2007) การใช้เคโอลินไนต์ (Kaolinite) และมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับโลหะหนัก (Gupta and Bhattacharyya, 2012) การใช้แร่ดิน (Aloji clay) ในการดูดซับตะกั่ว(II) (Obayomi and Auta , 2019) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

(ที่มา:<https://employees.csbsju.edu/>)



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์

(ที่มา: Ruan, B. et al., 2018)

2.1.3 การดูดซับและการพาโลหะหนักเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์

จากการศึกษาการดูดซับ ทองแดง (Cu) พรอท (Pb) และ โครเมียม (Cr) ของโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na-montmorillonite) ที่ค่าพีเอช 3.5 , 4.5 และ 5.5 ที่ความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกัน และการศึกษาความเข้มข้นที่แตกต่างของ อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) ที่ส่งผลต่อการดูดซับของโลหะหนัก ทำให้ทราบว่าโครเมียมถูกดูดซับมากที่สุด ตามด้วย ทองแดงและตะกั่ว นอกจากนี้เมื่อการดูดซับจะอ่อนลงเนื่องจากค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น การดูดซับโลหะ

หนักของมอนต์มอริลโลไนต์ถูกยับยั้งเมื่อมีแคลเซียมและแมกนีเซียม แต่หากมีอะลูมิเนียมและเหล็กจะมีรูปแบบการดูดซับโลหะหนักที่แตกต่างออกไป โดยทั่วไปอะลูมิเนียมและเหล็กจะยับยั้งการดูดซับโลหะหนักเมื่อมีค่าพีเอชหรือความเข้มข้นของธาตุหลักที่ต่ำ (Zhu et al., 2011)

การศึกษาของ Bhattacharyya และ Gupta (2008) ใช้แร่เคโอลิไนต์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีความเป็นกรดกำจัดแคดเมียม (II) จากนั้นจากการทดลองพบว่าค่าการดูดซับของ Langmuir ของแร่เคโอลิไนต์อยู่ระหว่าง 3.0 – 11.4 มิลลิกรัม/กรัม สำหรับแร่มอนต์มอริลโลไนต์ มีค่าระหว่าง 26.2 – 33.2 มิลลิกรัม/กรัม สามารถสรุปได้ว่าแร่เคโอลิไนต์มีความสามารถในการดูดซับน้อยแคดเมียม (II) กว่าแร่มอนต์มอริลโลไนต์ เช่นเดียวกับโลหะหนักชนิดอื่น เช่น สังกะสี สารหนู เป็นต้น นอกจากนี้ ยังพบว่า การดูดซับแคดเมียม (II) ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ โดยการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเป็นกรดลดลง

การศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวของแคดเมียมโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะ (Facilitator) ในคอลัมน์ทรายอิมิต์ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 8 ของ บัณฑิตา ราชานาค (2019) พบว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์พาแคดเมียมออกมาจากคอลัมน์มากขึ้น เนื่องจากค่าพีเอชที่มากขึ้นทำให้ค่า Zeta potential ที่เป็นประจุบนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีความเป็นลบมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับแคดเมียมที่เป็นประจุบวกได้ดีขึ้น เมื่อแคดเมียมติดอยู่ที่ผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

การศึกษาของ Chotpanarat และ Kiatvarangkul (2018) ที่เกี่ยวกับการสังเกตผลของค่าพีเอชต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียมไอออนโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ (Montmorillonite KSF colloid) เป็นตัวพาผ่านคอลัมน์ทรายอิมิต์ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 8 พบว่า พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นแคดเมียมจะถูกมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ดูดซับไว้ ทำให้สามารถเคลื่อนตัวไปกับคอลลอยด์ออกจากคอลัมน์ได้มากขึ้น

งานวิจัยของ Tang และ Weisbrod (2009) ซึ่งเกี่ยวกับผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก โดยศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของตะกั่ว (Pb) โดยคอลลอยด์ในรอยแตกของหิน ในการทดลองได้เตรียมสารละลาย (Tracer solution) ที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์และกรดฮิวมิก (Humic Acid) ลงในน้ำฝนเทียมที่มีตะกั่วละลายอยู่ ผลการทดลองพบว่า ตะกั่วจะเคลื่อนเมื่อมีคอลลอยด์รวมอยู่ด้วยเท่านั้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชและอัตราการดูดซับของโซเดียมจะส่งผลต่อการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์เข้าสู่รอยแตกของหินเพิ่มขึ้น

การศึกษาของ Garcia (2010) ศึกษาการกำเนิด เสถียรภาพ และการเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ในระบบน้ำ โดยให้พีเอชสารละลายมีค่าแตกต่างกันที่ 4.5 6 และ 8.5 และกำหนดค่าความแรงไอออน (Ionic strength) รวมเท่ากัน ผลการศึกษาพบว่า ความเสถียรภาพของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ลดลงเมื่อมีค่าความแรงไอออนสูงขึ้นและค่าพีเอชลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ามีสมรรถนะที่ตอบสนองต่อตัวแปรทั้งสองด้วย

2.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์

โดยทั่วไปสามารถพบอนุภาคคอลลอยด์ได้ ทั้งในดินและชั้นน้ำบาดาล (Sun et al., 2001) อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร (Kretzschmar et al., 1999) ในธรรมชาติมีความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำบาดาลระหว่าง 10^8 ถึง 10^{17} อนุภาคต่อลิตร (Kim, 1991) นอกจากนี้ อนุภาคคอลลอยด์ในธรรมชาติยังรวมถึงดิน เศษหิน แร่ และสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดดังกล่าว (Posadas et al., 2001) และความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ในสภาพแวดล้อมใต้ผิวดินตามธรรมชาติ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 35 - 100 มิลลิกรัม/ลิตร (Zhuang et al., 2003)

การเคลื่อนตัวของอนุภาคคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีรูพรุน มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ซึ่งการทดลองในคอลัมน์ในห้องปฏิบัติการเป็นที่นิยมมากที่สุด โดยตัวกลางที่นิยมมาใช้ คือ ททรายควอตซ์ ข้อดีคือ สามารถควบคุมเงื่อนไขของการทดลองได้ และสามารถศึกษาแบบแยกตัวแปรในระบบที่สนใจได้ (Ryan and Elimelech, 1996) แต่ก็มีข้อเสียคือ แบบจำลองนี้ไม่สามารถแสดงถึงระบบในธรรมชาติที่ซับซ้อนได้

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของคอลลอยด์ชนิดที่เป็นสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ เช่น ความแรงไอออน (Ionic strength) (Ryan and Elimelech, 1996; Grolimund et al., 1998; Walshe et al., 2010) และ พีเอช (pH) (Ryan and Elimelech, 1996) มีการทดลองที่แสดงถึงความแรงไอออนลดลงทำให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น (Roy and Dzombak, 1996) จากรายงานของBunn และArthington (2002) อธิบายว่าความเข้มข้นที่ลดลงของแคลเซียม (II) และค่าพีเอชที่สูง เหมาะแก่การเคลื่อนตัวของอินทรีย์สารออกจากดินได้มากขึ้น

จากการศึกษาผลกระทบของพีเอชต่ออนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำฝน ของ Aryal และคณะ (2012) พบว่าในสภาวะต่าง (Alkaline condition) มีการเติบโตของอนุภาคคอลลอยด์อย่างชัดเจนโดยเป็นผลจากการรวมตัวและการสลายของฮิวมิก

การศึกษามลกระทบของพีเอชและความแรงไอออนต่อการเคลื่อนตัวของอนุภาคคอลลอยด์ผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน ของ Patil (2008) ทำการทดลองโดยปล่อยให้อนุภาคคอลลอยด์ไหลในน้ำที่มีอัตราการไหลคงที่ผ่าน

คอมลัมน์ทรายควอตซ์ ภายใต้เงื่อนไขที่มีค่าพีเอชและค่าแรงไอออนต่างกัน พบว่าค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์ลดลง เนื่องจากค่าพีเอชส่งผลต่อค่าประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ค่าพีเอชสูง คอลลอยด์จะมีประจุลบเยอะ เนื่องจากมี OH^- เป็นผลทำให้มีแรงดึงดูดกับทรายควอตซ์มากขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัวลดลง นอกจากนี้การศึกษาเรื่องการกำเนิด ความเสถียร และการเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ในระบบน้ำของ García (2010) ทำการทดลองโดยให้ค่าพีเอชแก่สารละลายที่แตกต่างกัน แต่มีค่าแรงไอออนเท่ากันพบว่าการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น เมื่อมีค่าพีเอชลดลงและค่าแรงไอออนเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าพีเอชและค่าความแรงไอออนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์

2.1.5 การดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์สามารถทำให้สารปนเปื้อนเคลื่อนตัวไปไกลมากขึ้นหรือเคลื่อนที่ช้าลงด้วยการดูดซับสารปนเปื้อนเหล่านั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคคอลลอยด์หรืออัตราการไหลของน้ำ ความแตกต่างระหว่างคอลลอยด์แท้ (True colloids) กับคอลลอยด์เทียม (Pseudo Colloids) คือ คอลลอยด์แท้มีต้นกำเนิดมาจากสารปนเปื้อนเช่น นิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclides) ที่มีพลังงานสูง สามารถสร้างอนุภาคกัมมันตรังสีขึ้นใหม่ภายในนิวเคลียสหรือโดยการเปลี่ยนแปลงภายใน เมื่ออนุภาคคอลลอยด์มีความเข้มข้นสูงกว่าความสามารถในการละลายก็จะเกิดการตกตะกอน ส่วนคอลลอยด์เทียมเกิดจากแหล่งที่ไม่มีสารปนเปื้อน เช่น อนุภาคดินเหนียว ที่สามารถกลายเป็นสารปนเปื้อนได้โดยการดูดซับมลพิษบนพื้นผิว (Ibaraki and Sudicky, 1995)

จากการศึกษาของ Sen และ คณะ (2002) พบว่าสารปนเปื้อนสามารถถูกดูดซับได้ 2 แบบคือโดยอนุภาคคอลลอยด์เนื่องจากการเคลื่อนที่และโซลิดแมทริกซ์ (Solid matrix) เนื่องจากความดันที่ลดลงจากการกระจายตัว ยังมีการศึกษาผลของค่าพีเอชและค่าความแรงไอออนที่ส่งผลต่อการดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์ในคอมลัมน์บรรจุทรายควอตซ์อิมิตัว (Zhu et al., 2011) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก เช่น ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก โดยศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของตะกั่ว (Pb) โดยคอลลอยด์ในรอยแตกของหิน ของ Tang และ Weisbrod (2009) ผลการทดลองพบว่า ตะกั่วจะเคลื่อนเมื่อมีคอลลอยด์รวมอยู่ด้วยเท่านั้นนอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชและอัตราการดูดซับของโซเดียมจะส่งผลต่อการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์เข้าสู่รอยแตกของหินเพิ่มขึ้น

2.2 ทฤษฎี

2.2.1 ค่า Retardation factor คือ อัตราความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของสารปนเปื้อนต่อความเร็วของน้ำ คำนวณจากพื้นที่เหนือกราฟ Breakthrough โดยคำนวณจากระยะเริ่มถึงจุดที่ $C/C_0 = 1$

$$R_{area} = PV_1 - \sum_{i=0}^{PV_1} \left(\frac{C}{C_0} \right) \Delta PV$$

สมการ 1 Retardation factor

C (mg/L) คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ C_0 (mg/L) คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น และ PV_1 คือ จำนวนของปริมาตรรูพรุนที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ คือ 1.0

2.3 HYDRUS-1D model

แบบจำลอง Hydrus-1D ใช้เพื่อประเมินการเคลื่อนตัวของไอออนโลหะหนักในดินอิมตัวโดยใช้ Linear/nonlinear equilibrium convection-dispersion (CD_{eq}) และ Chemical non-equilibrium process โดยจะแสดงในสมการที่ 2 และ 3

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial C^*}{\partial t} \pm \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right]_{rxn}$$

สมการ 2 Linear/nonlinear equilibrium convection-dispersion(CD_{eq})

C (mg/l) คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำในโพรง (Pore water) D_L (cm^2/day) คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว v_x (cm/day) คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ย t (day) คือ เวลา θ คือ ความพรุน ρ (g/cm^3) คือ ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของทราย C^* (mg/l) คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในทราย และ rxn (mg/(L day)) คือ ตัวห้อยอธิบายปฏิกิริยาทางเคมีหรือชีวภาพที่นำมาใช้การดูดซับของสารปนเปื้อน

แบบจำลอง Chemical non-equilibrium process หรือ Two-site model (TSM) จะร่วมกับ Freundlich isotherm โดยแบบจำลองนี้ถูกใช้เพื่ออธิบายการดูดซับและการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา rate-limited

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial s^e}{\partial t} + \rho \frac{\partial s^k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial v_x C}{\partial x} \pm \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right]_{rxn}, \quad 3a$$

$$s^e = f K_f C^{1/n}, \quad 3b$$

$$\rho \frac{\partial s^k}{\partial t} = \alpha_k \rho (s_e^k - s^k) - \varphi_k, \quad 3c$$

$$s^k = (1 - f) K_f C^{1/n} \quad 3d$$

สมการ 3 Chemical non-equilibrium process

S^e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับในบริเวณ type-1 สันนิษฐานว่าเป็นบริเวณที่เกิดขึ้นทันที (Instantaneous sites) (mg/g soil) S^k คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับในบริเวณ type-2 สันนิษฐานว่าเป็นกระบวนการจลน์อันดับแรก (first-order kinetic process) (mg/g soil) f คือ ส่วนหนึ่งของบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนในสภาวะสมดุล α_k (1/day) คือ สัมประสิทธิ์อัตราอันดับที่ 1 การเคลื่อนตัวของสารละลายในคอลัมน์ จะแสดงในสมการที่ 3a φ_k คือ Sink – source ที่บริเวณที่มีการดูดซับ (Kinetic sorption sites) (mg/(L day)) ในสมการที่ 3b สมดุลมวลของบริเวณ type-2 คำนวณจากสมการ 3c และสมการที่ 3d แสดงความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับในบริเวณ type-2 ที่ความเข้มข้นเฉพาะของสารละลาย เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (Chotpantararat and Kiatvarangkul, 2018)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลของอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนที่ของสาร วิธีการทดลองในคอมลัมน์ทรายอิมมั่ว การรายงานการปนเปื้อนของสังกะสีและแคดเมียมในประเทศไทย

3.2 ออกแบบการทดลองและเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง

1) มอนต์มอริลโลไนต์ K10 (Montmorillonite K10) จาก SIGMA-ALDRICH มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ประมาณ 30 มิลลิอิควิวาเลนท์ ต่อ 100 กรัม และมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 220 – 270 ลูกบาศก์เมตร/กรัม แร่มอนต์มอริลโลไนต์มีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge ; PZC) ที่ค่าพีเอชระหว่าง 5.0 – 6.0 (Lui et al., 2008) มีการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่และหาปริมาณร้อยละของแร่มอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD) (Bruker AXS ,Germany) นอกจากนี้ใช้เครื่อง X-ray fluorescence (XRF) (Bruker AXS ,Germany) เพื่อศึกษาองค์ประกอบของออกไซด์ โดยใช้เครื่อง XRD และ XRF ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

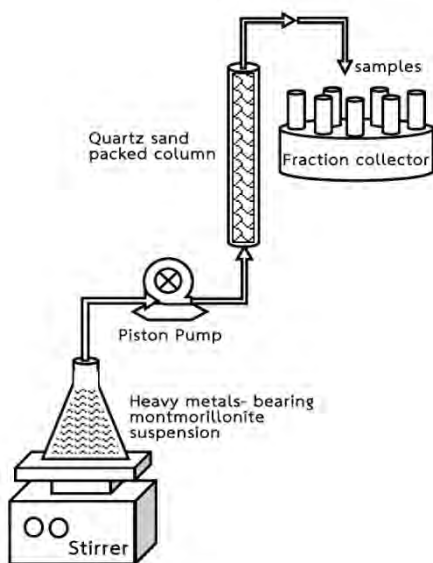
2) เม็ดทราย (Ottawa sand) จาก Fisher Scientific เป็นทรายควอตซ์ทั่วไป มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.6 – 0.8 มิลลิเมตร ค่าความพรุนยังผล (Effective porosity) 0.32 และความหนาแน่น 1.43 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยก่อนนำมาทำการทดลอง ต้องมีการทำความสะอาดด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และ กรดไนตริก (HNO₃) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ตามลำดับ เพื่อกำจัดโลหะและอนุภาคอื่นๆ จากเม็ดทราย

3) สารละลายสังกะสี ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมโดยการละลายสังกะสีไนเตรต (Zn(NO₃)₂•6H₂O(s)) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ และใช้ NaOH และ HNO₃ เพื่อปรับค่าพีเอชของสารละลาย

4) สารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมโดยการละลายแคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(\text{s})$) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ และใช้ NaOH และ HNO_3 เพื่อปรับค่าพีเอชของสารละลาย

3.2.2 การเตรียมคอลัมน์

ทำการทดลองคอลัมน์ตามการศึกษาของ Chotpantararat และ Kiatvarangkul (2018) ใช้คอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 2.5 เซนติเมตร หนา 0.25 เซนติเมตร และยาว 8.5 เซนติเมตร โดยก่อนทำการทดลองต้องล้างคอลัมน์ด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และ HNO_3 ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ตามลำดับ โดยของสารละลายจะถูกสูบจากด้านล่างสู่ด้านบนของคอลัมน์ โดยกำหนดความเร็วในการไหลผ่านของของไหล ประมาณ 0.159 เซนติเมตร/วินาที ภายในคอลัมน์จะบรรจุทราย Ottawa โดยแต่ละคอลัมน์จะมีค่า 1 Pore volume (PVs) ประมาณ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมัตว
(ที่มา : Wikiniyadhane, 2012)



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมัตว

3.2.3 การเตรียมทรายที่ใช้บรรจุในคอลัมน์

1. ล้างด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก แล้วจึงล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
2. ล้างด้วยสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก แล้วจึงล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
3. อบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
4. เก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีซิลิกาเจลอยู่ภายในเพื่อดูดความชื้น



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการล้างทรายด้วยเครื่องอัลตราโซนิก

3.2.4 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อใช้ในการทดลองคอลัมน์

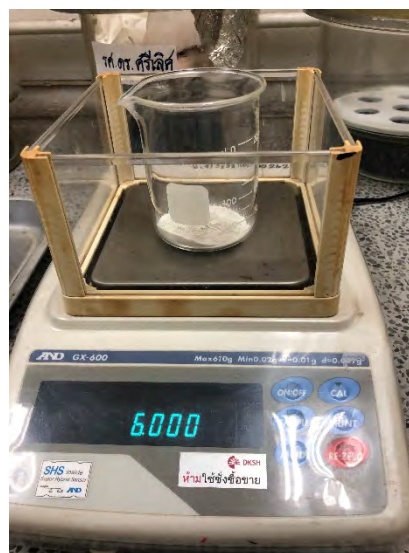
ก่อนทำการทดลองต้องปรับสภาพแรมมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนนำมาใช้ทดลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เติมนอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) 20 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ คนแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. สูบสารละลายมาครึ่งหนึ่งของสารละลายทั้งหมด
3. นำส่วนที่สูบครึ่งหนึ่ง มาอบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4. นำมอนต์มอริลโลไนต์อบแห้ง เติมแคลเซียมไรต์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 400 มิลลิลิตร ลงในมอนต์มอริลโลไนต์ 20 กรัม แล้วเขย่าโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (กรณีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ถึง 20 กรัม ให้ปรับเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ให้เป็นไปตามอัตราส่วนข้างต้น)
5. แยกมอนต์มอริลโลไนต์ออกมาโดยการรินสารละลายใสออกจากตะกอน (Decantation)
6. ล้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยน้ำปราศจากไอออน จนไม่มีคลอไรด์ไอออน โดยวัดค่า EC เท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่มีคลอไรด์ไอออนแล้ว
7. อบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์หลังตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์อบแห้ง

3.2.5 การเตรียมสารละลายสังกะสีในเตรต

1. ตวง $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ จำนวน 4.549 กรัม
2. นำมาละลายในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ และปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.6 การเตรียมสารละลายแคดเมียมในเตรต

1. ตวง $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ จำนวน 2.744 กรัม
2. นำมาละลายในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ และปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.7 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และสังกะสี

1. เติมนมอนต์มอริลโลไนต์ 400 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัม/ลิตร) ลงในขวดปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นวางในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
2. เติมนสารละลายสังกะสีในเตรต 5 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร)
3. ปรับค่าพีเอชโดยการเติม NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. ปริมาตรสุดท้ายจะเป็น 500 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์และสังกะสีจะเท่ากับ 100 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

3.2.8 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และสังกะสีกับแคดเมียม

1. เติมนมอนต์มอริลโลไนต์ 400 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัม/ลิตร) ลงในขวดปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นวางในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
2. เติมนสารละลายสังกะสีในเตรต 5 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร) และ สารละลายแคดเมียม 5 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร)
3. ปรับค่าพีเอชโดยการเติม NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. ปริมาตรสุดท้ายจะเป็น 1000 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ สังกะสี และ แคดเมียมจะเท่ากับ 50 ,5 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

3.3 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.1 วิธีการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสังกะสีโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

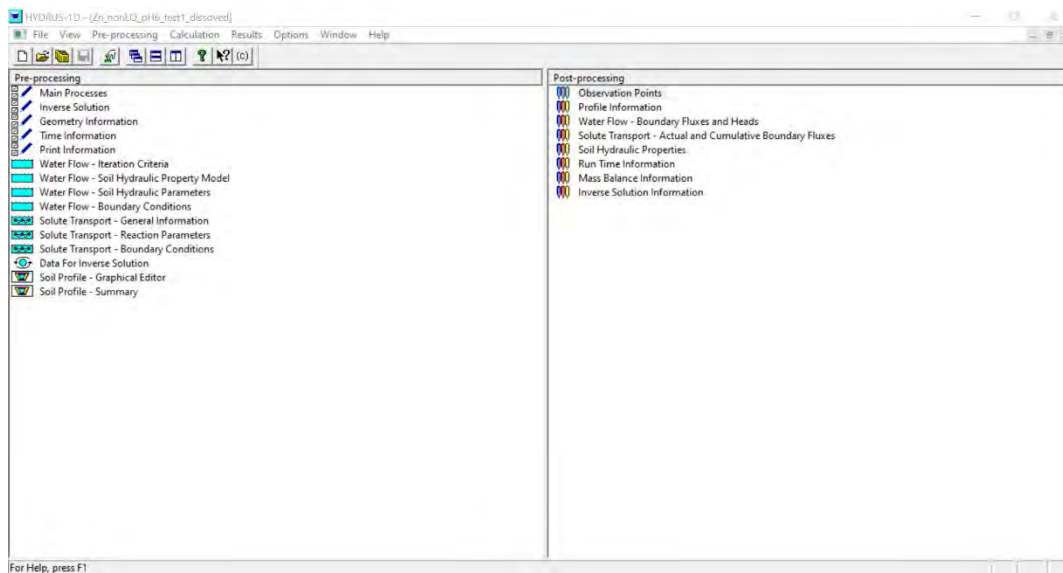
1. ก่อนใช้คอลัมน์ต้องทำการปรับเทียบความเข้มข้นด้วยน้ำปราศจากไอออน และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอช 3 และ 6 อย่างน้อย 5 PVs หรือจนกว่าสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์จะมีค่าพีเอชนั้นๆ โดยมีค่าความแรงไอออน (ionic strength) 0.003 โมลาร์ เพื่อให้การไหลอยู่ในสภาวะคงที่และมีสภาพทางเคมีใกล้เคียงกับมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง
2. สารละลายของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ประกอบด้วยสังกะสีที่มีค่าพีเอชนั้นๆ จะถูกคนด้วยเครื่อง Stirrer ในขณะที่ถูกสูบขึ้นไปที่คอลัมน์ ด้วยความเร็วคงที่ (0.159 เซนติเมตร/นาที) เป็นปริมาตรประมาณ 21 PVs
3. จากนั้นเปลี่ยนเป็นการสูบสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ อีกครั้งจนครบ 35 PVs

4. สารละลายทั้งหมดที่เคลื่อนผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว จะถูกเก็บไว้ในหลอดตามช่วงเวลาต่างๆ โดยเครื่อง Fraction Collector (เก็บตัวอย่างทุกครั้งชั่วโมงจนสารละลายผ่านคอลัมน์ครบ 35 PVs และใช้ตัวแทนแต่ละ Pore volume ไปตรวจวัด)
- 3.3.2 วิธีการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของสังกะสีและแคดเมียมโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
1. ก่อนใช้คอลัมน์ต้องทำการปรับเทียบความเข้มข้นด้วยน้ำปราศจากไอออน และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอช 3 และ 6 อย่างน้อย 5 PVs หรือจนกว่าสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์จะมีค่าพีเอชนั้นๆ โดยมีค่าความแรงไอออน (ionic strength) 0.003 โมลาร์ เพื่อให้การไหลอยู่ในสภาวะคงที่และมีสภาพทางเคมีใกล้เคียงกับมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และสังกะสีกับแคดเมียมที่ใช้ในการทดลอง
 2. สารละลายของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ประกอบด้วยสังกะสีกับแคดเมียมที่มีค่าพีเอชนั้นๆ จะถูกคนด้วยเครื่อง Stirrer ในขณะที่ถูกสูบขึ้นไปที่คอลัมน์ ด้วยความเร็วคงที่ (0.159 เซนติเมตร/นาที) เป็นปริมาตรประมาณ 21 PVs
 3. จากนั้นเปลี่ยนเป็นการสูบสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ อีกครั้งจนครบ 35 PVs
 4. สารละลายทั้งหมดที่เคลื่อนผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว จะถูกเก็บไว้ในหลอดตามช่วงเวลาต่างๆ โดยเครื่อง Fraction Collector (เก็บตัวอย่างทุกครั้งชั่วโมงจนสารละลายผ่านคอลัมน์ครบ 35 PVs และใช้ตัวแทนแต่ละ Pore volume ไปตรวจวัด)
- 3.3.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว สามารถตรวจสอบได้ด้วย เครื่อง UV-Visible Spectroscopy ที่มีความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร และจะใช้ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ความเข้มข้น 2 กรัม/ลิตร เจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ (0,10,20,30,40,50,60,70,80,90 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร) ในการทำเส้นโค้งปรับเทียบ โดยวิเคราะห์ที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 3.3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีและแคดเมียมที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว
- การวัดความเข้มข้นของโลหะหนัก โดยจะแบ่งการตรวจวัดออกเป็น 2 ส่วนคือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย และ ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมด ซึ่งโลหะหนักทั้งหมดคือโลหะหนักในสารละลายร่วมกับโลหะหนักที่อยู่บนผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ โดยมีขั้นตอนการเตรียมและตรวจวัด ดังนี้

1. ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย ตรวจวัดได้โดย
 - 1.1 ปริมาณครึ่งหนึ่งจะถูกปั่นแยกที่ 9000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที
 - 1.2 กรองผ่านกระบอกกรอง PTFE ขนาด 0.22 ไมโครเมตร
 - 1.3 โลหะหนักที่ละลายจะวิเคราะห์โดยใช้ Atomic absorption spectroscopy (AAS, Perkin Elmer model AAnalyst 200)
2. ความเข้มข้นรวมของโลหะหนัก ถูกกำหนดโดย
 - 2.1 ปริมาณครึ่งหนึ่งที่เหลือถูกเติมด้วยกรดไนตริก ความเข้มข้น 16 โมลาร์ ด้วย 1:1 กับสารละลาย
 - 2.2 ให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างใส่ในหลอดแก้ว แช่ในบีกเกอร์ที่เติมน้ำ ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate) ในตู้ดูดควัน เมื่ออุณหภูมิน้ำถึง 90 องศาเซลเซียสจึงยกตัวอย่างออก
 - 2.3 ความเข้มข้นรวมของโลหะหนักจะวิเคราะห์โดยใช้ Atomic absorption spectroscopy (AAS, Perkin Elmer model AAnalyst 200)
- 3.3.5 การวิเคราะห์ขนาดและ Zeta potential ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
การวิเคราะห์ขนาดและ Zeta potential ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ทั้งก่อนนำมาทำการทดลอง และหลังการทำทดลองที่พีเอชต่างๆ โดยใช้เครื่อง Malvern Zetasizer Nano ที่คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ และ ค่า Zeta potential
- 3.3.6 การวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)
เพื่อดูพื้นผิวของทรายและวิเคราะห์ธาตุของโลหะหนักบนวัสดุ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL, JSM-6 610 LV and Oxford, X-MaxN 50) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยโปรแกรม HYDRUS-1D

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ไปพิตกับแบบจำลอง Linear / nonlinear equilibrium convection dispersion (CD_{eq}) และ แบบจำลอง Two-site (TSM) เพื่อจำลองการเคลื่อนตัวของสัณกะสีโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว



รูปที่ 3.6 โปรแกรม HYDRUS-1D

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ผลต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมมัลชันที่ค่าพีเอช 6

มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และสังกะสีถูกสูบเข้าไปในคอลัมน์ทรายอิมมัลชันโดยมีค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 6 เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสี ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

ตาราง 4.1 สมบัติของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อดูการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมมัลชันสำหรับค่าพีเอช 6 และ 3 ของสารละลาย

คอลัมน์ที่	พีเอช	สารละลาย	ความยาว (ซม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	ความหนาแน่นรวม (กรัม/ซม. ³)	ความพรุน(-)	ปริมาตรรูพรุน (ซม. ³)	ความเร็วในการไหลซึมผ่าน (เมตร/วัน)	ค่าความแรงไอออน (มิลลิโมลาร์)
1	6.24	Zn	8.50	2.50	1.62	0.39	13.54	2.29	0.003
2	3.46	Zn	8.50	2.50	1.63	0.39	14.63	2.29	0.003
3	6.21	Zn+Cd	8.50	2.50	1.62	0.38	14.80	2.29	0.003

ในการทดลองมีการตั้งค่าความเร็วในการไหลผ่านให้คงที่ เพื่อให้ผลการทดลองขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและไม่มีปัจจัยอื่นมารบกวน นอกจากนั้นได้ทำการวัดขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ที่วัดได้จากเครื่อง Malvern Zetasizer Nano โดยพบว่ามีความเฉลี่ยเท่ากับ 473.97 นาโนเมตร และมีค่าอยู่ระหว่าง 456.9-491.1 นาโนเมตร (ตารางที่ 4.2)

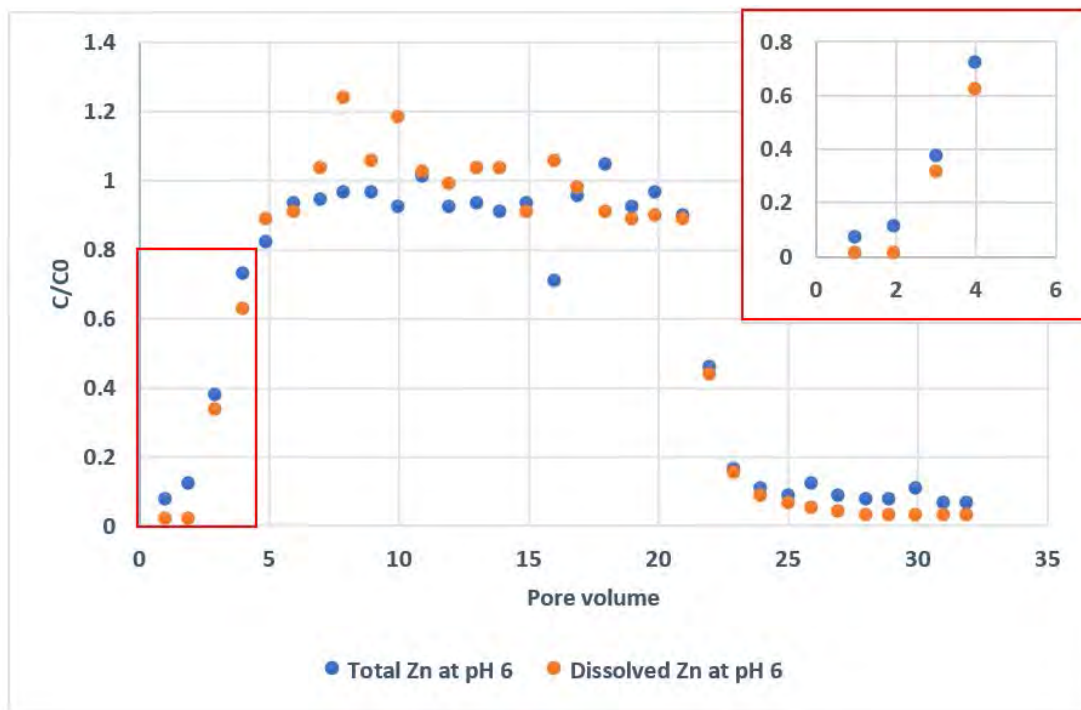
ตาราง 4.2 ขนาดของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

จำนวนครั้งที่วัด	ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (นาโนเมตร)
1	491.1
2	456.9
3	473.9
SD	17.1001

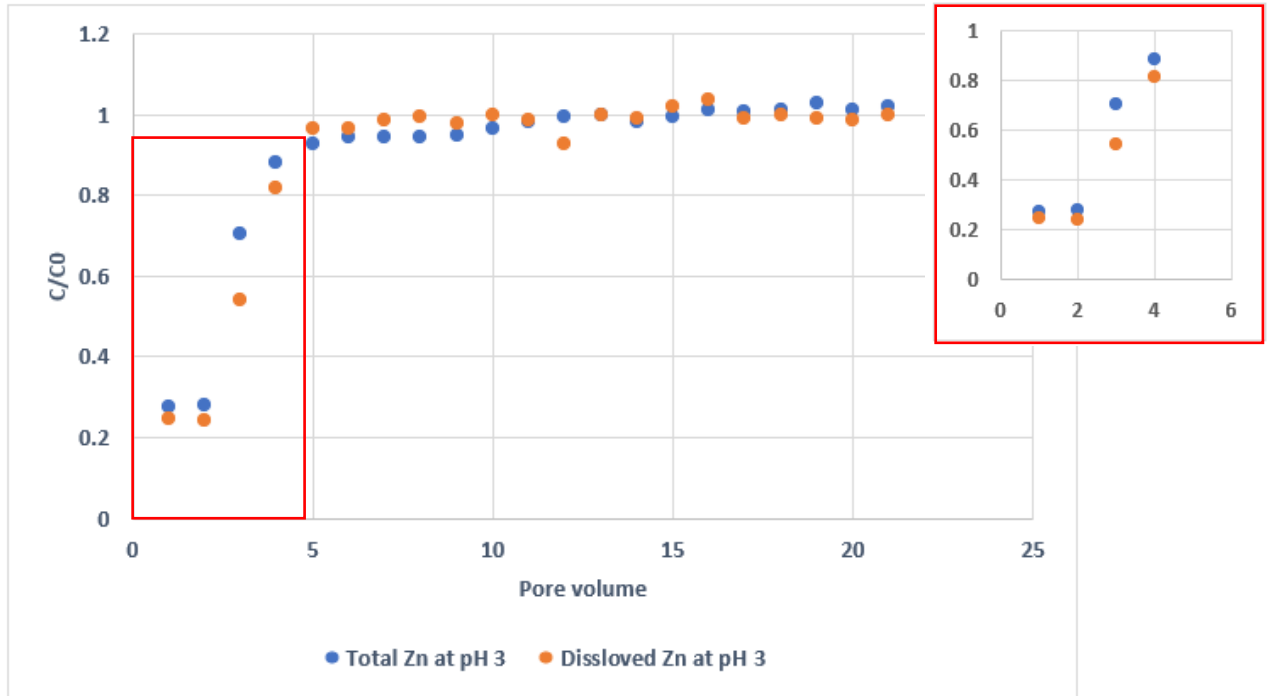
ผลการเคลื่อนตัวของสังกะสีในคอลัมน์ทรายอิมมัวซึ่งมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะสามารถทราบได้จากกราฟเบรคทู (Breakthrough curve) ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสีกับอัตราส่วนปริมาตรรูพรุน (PV, pore volume) ซึ่งหมายถึงปริมาตรของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ทรายไปต่อปริมาตรของช่องว่างในตะกอนทรายในคอลัมน์ ดังแสดงในรูป 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 เนื่องจากการเก็บตัวอย่างที่นานทำให้การวัดผลค่าความเข้มข้นช่วง PV ที่ 21-35 เกิดความคลาดเคลื่อน จึงไม่นำมาพิจารณาในการสร้างกราฟเบรคทู

ตาราง 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีและแคดเมียมของคอลัมน์ที่ 1-3

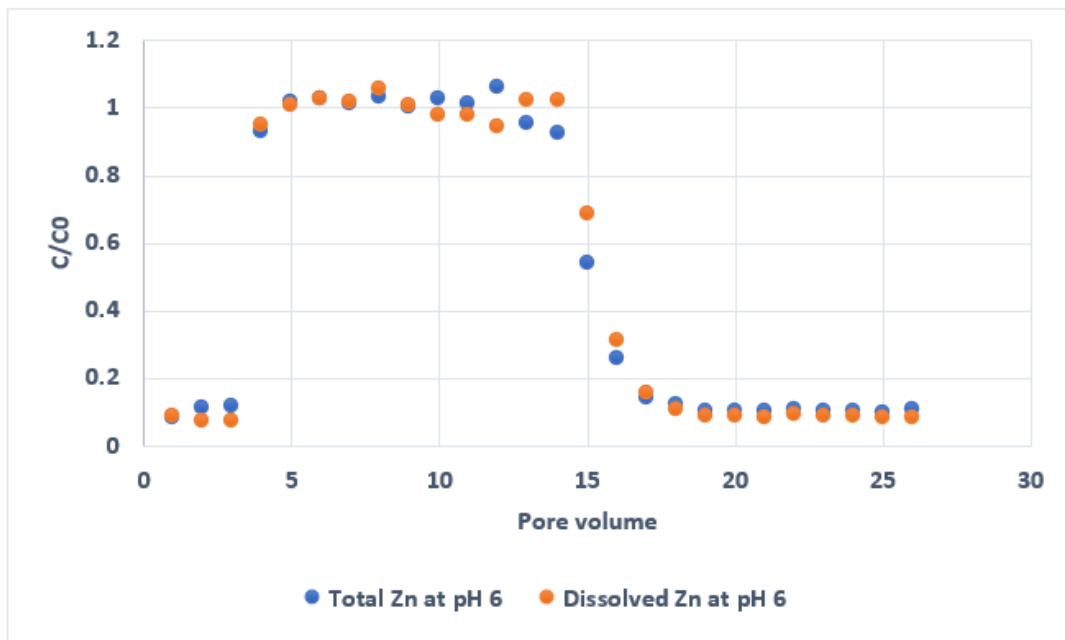
คอลัมน์ที่	พีเอช	สังกะสีใน สารละลาย (ppm)	สังกะสี ทั้งหมด (ppm)	แคดเมียมใน สารละลาย (ppm)	แคดเมียม ทั้งหมด (ppm)	สังกะสี บนผิว ของ มอนต์ มอริลโล ไนต์ (ppm)	แคดเมียม บนผิว ของ มอนต์มอ ริลโลไนต์ (ppm)	มอนต์ มอริลโล ไนต์ (ppm)
1 (Zn)	6.24	7.87	10.00	-	-	2.13	-	100
2 (Zn)	3.46	9.90	10.00	-	-	0.10	-	100
3 (Zn+Cd)	6.21	4.02	5.00	4.00	5.00	0.98	1.00	100



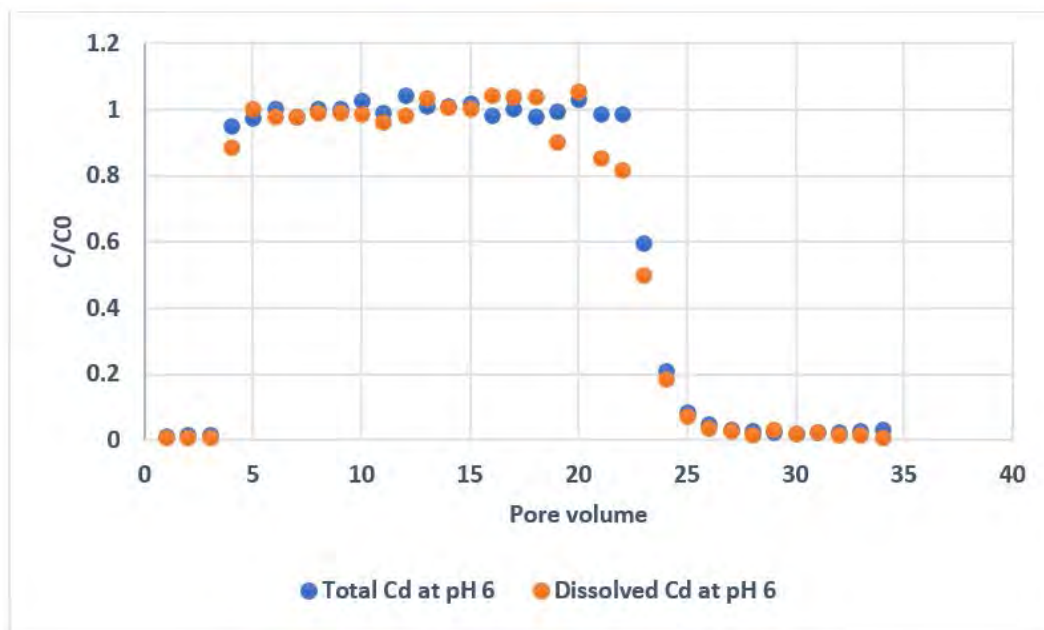
รูปที่ 4.1 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสีกับปริมาตรรูพรุนที่ pH 6



รูปที่ 4.2 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสีกับปริมาณรูพรุนที่ pH 3



รูปที่ 4.3 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสังกะสี (กรณีผสมกับแคดเมียม) กับปริมาณรูพรุนที่ pH 6



รูปที่ 4.4 กราฟ Breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของแคดเมียม (กรณีผสมกับสังกะสี) กับ ปริมาตรรูพรุนที่ pH 6

เมื่อคำนวณพื้นที่เหนือกราฟของกราฟ Breakthrough โดยคำนวณจากระยะจุดเริ่มต้นถึงจุดที่ C/C_0 เท่ากับ 1 เพื่อหาค่า Retardation factor (R_F) โดยค่า Retardation factor คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของ โลหะหนักต่อความเร็วของน้ำ อาจกล่าวได้ว่า ความเร็วของการเคลื่อนตัวของโลหะหนักเคลื่อนตัวช้ากว่าน้ำก็เท่า จากค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของความเร็วในการไหลระหว่างโลหะหนักทั้งหมด และ โลหะหนักในสารละลาย ตาม ตารางที่ 4.4 พบว่า การเคลื่อนตัวของสังกะสีทั้งหมดเร็วกว่าการเคลื่อนตัวของสังกะสีในสารละลายเมื่อมีความพี เอช (เท่ากับ 6 และ 3 โดยมีเปอร์เซ็นต์ความต่างของการไหลเท่ากับ 38.69 % และ 8.85 % ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ บัณฑิตา ราชานาค (2019) พบว่า การเคลื่อนตัวของแคดเมียมทั้งหมดเร็วกว่าการเคลื่อนตัวของแคดเมียมในสารละลาย จึงสรุปได้ว่ามอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์พาแคดเมียมออกมาได้ จำนวนมากกว่าสังกะสี นอกจากนั้น Humelnicu และคณะ (2015) พบว่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีของ แร่มอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มจาก 42.44% เป็น 71.67 % โดยค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 6.5 เช่นเดียวกับการศึกษา ของ Zhu และคณะ (2001) พบว่า ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ เพิ่มขึ้นจาก 74 % เป็น 87% โดยค่าพีเอชเพิ่มจาก 3.5 เป็น 6.5 ขณะที่เมื่อทำการทดลองมอนต์มอริลโรไนต์คอลลอยด์ร่วมกับ สังกะสีและแคดเมียมแล้ว พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของความเร็วในการไหลระหว่างสังกะสีทั้งหมด (Total Zinc) และ สังกะสีในสารละลาย (Dissolved Zinc) เท่ากับ -1.23 % และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของความเร็วใน

การไหลระหว่างแคดเมียมทั้งหมด (Total Cadmium) และ แคดเมียมในสารละลาย (Dissolved Cadmium) เท่ากับ -1.57 %

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความต่างของความเร็วการไหลระหว่างสังกะสีทั้งหมดในคอลัมน์ที่เป็นโลหะหนักผสมกับคอลัมน์ที่มีสังกะสีเพียงชนิดเดียว พบว่า ใน คอลัมน์ที่เป็นโลหะหนักผสม สังกะสีเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์ที่มีสังกะสีเพียงชนิดเดียว ที่พีเอช 6 คิดเป็น 7.66 % ซึ่งผลของการแย่งจับตัวกับมอนด์มอริลไลต์คอลลอยด์ระหว่างแคดเมียมทั้งหมดกับสังกะสีทั้งหมด และยังทำให้สังกะสีเคลื่อนที่เร็วกว่าแคดเมียม คิดเป็น 9.13 %

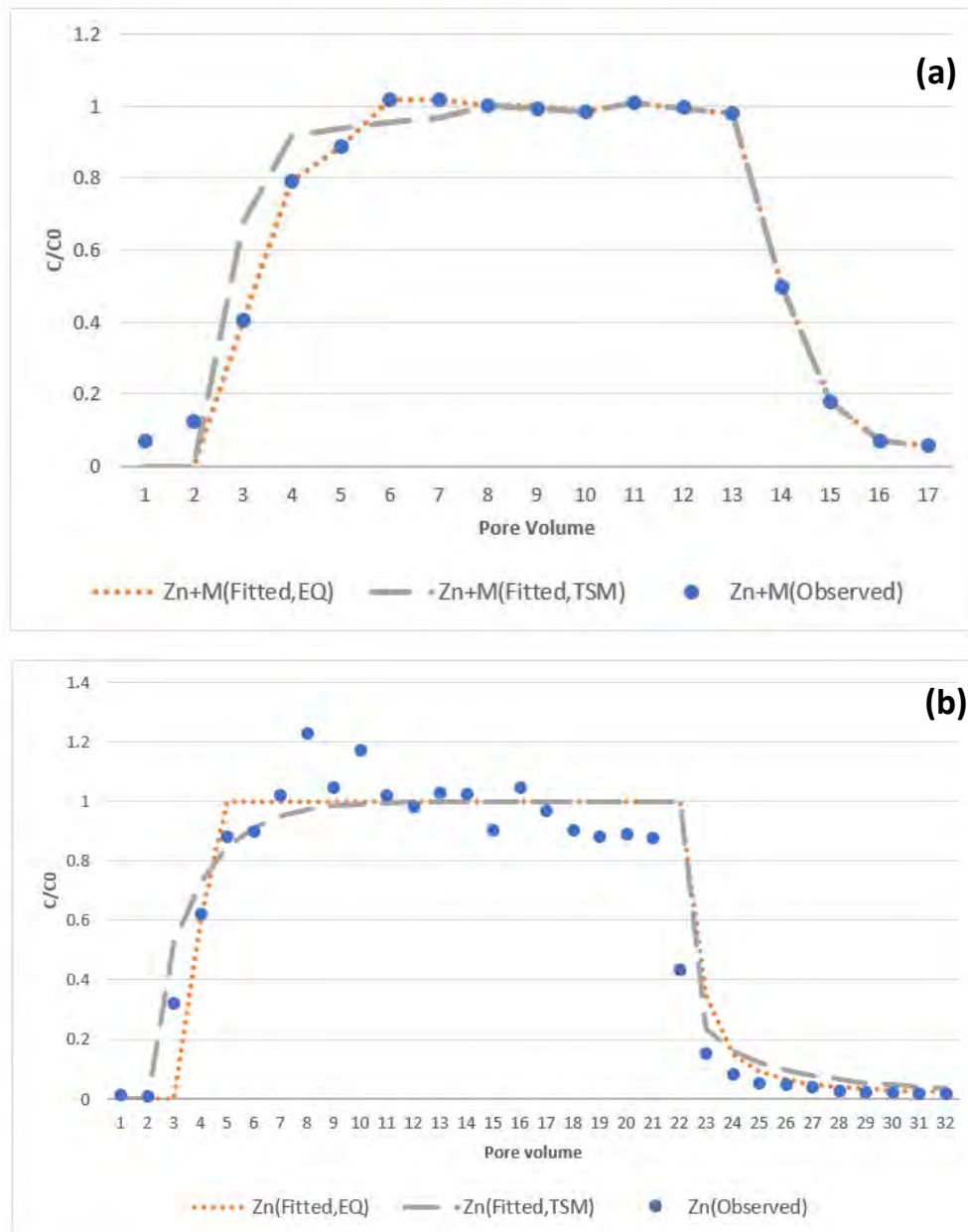
ตาราง 4.4 Retardation factor ของการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมของคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ที่พีเอช 3 และ 6

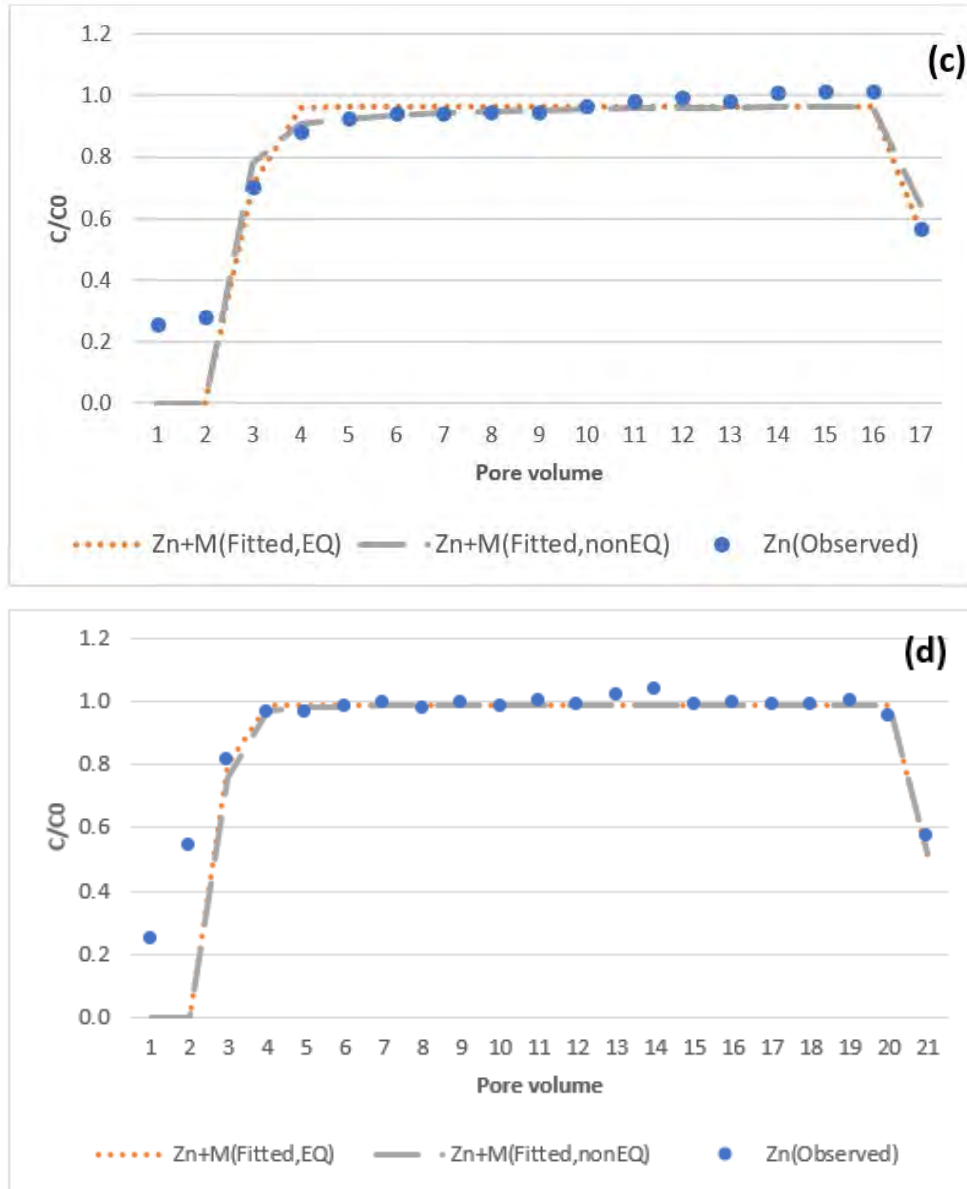
คอลัมน์ที่	พีเอช	โลหะหนัก	Retardation Factor (R _F)	% ความต่างของความเร็วในการไหล
1	6.24	สังกะสีทั้งหมด (Zn _{tot})	2.48	38.69
		สังกะสีในสารละลาย (Zn _{dis})	3.44	
2	3.46	สังกะสีทั้งหมด (Zn _{tot})	1.54	8.85
		สังกะสีในสารละลาย (Zn _{dis})	1.68	
3	6.21	สังกะสีทั้งหมด (Zn _{tot})	2.29	-1.23
		สังกะสีในสารละลาย (Zn _{dis})	2.35	
		แคดเมียมทั้งหมด (Cd _{tot})	2.52	-1.57
		แคดเมียมในสารละลาย (Cd _{dis})	2.61	
4*	6.01	แคดเมียมทั้งหมด (Cd _{tot})	3.07	30.33
		แคดเมียมในสารละลาย (Cd _{dis})	4.41	

* อ้างอิงจาก บัณฑิตา ราชานาค (2019)

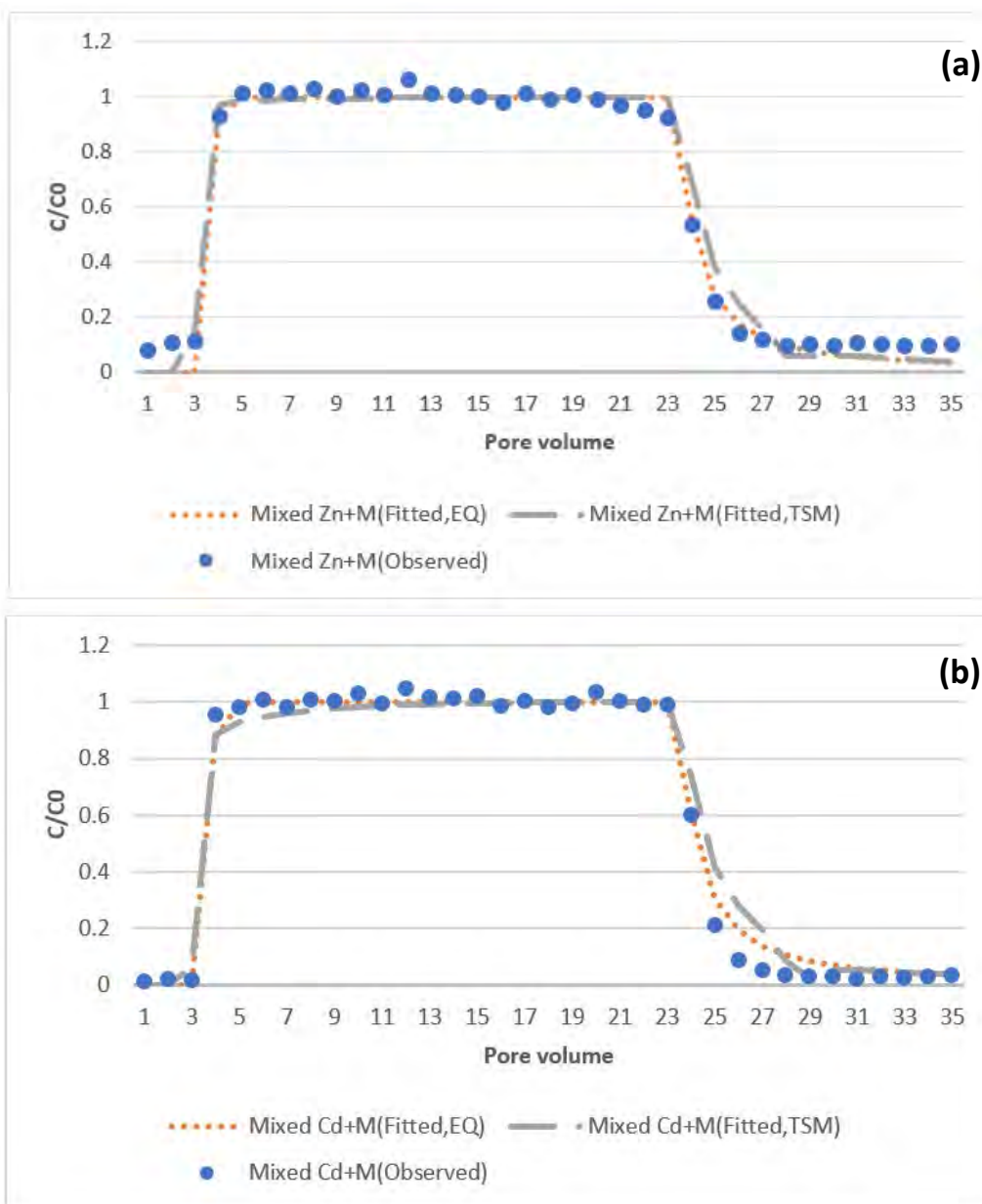
4.2 โมเดลของสังกะสีที่เคลื่อนตัวผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว โดยโปรแกรม HYDRUS-1D

โปรแกรม HYDRUS-1D ใช้เพื่อจำลองการเคลื่อนตัวของสังกะสีโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว โดยใช้แบบจำลอง nonlinear equilibrium convection dispersion (Eq) และ แบบจำลอง Two-site (TSM) แสดงในรูป 4.5 และ 4.6





รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium model (CD_{eQ}) และ Two-site model (TSM) จาก กราฟ Breakthrough ของสังกะสี (a) มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 6 (b) ไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 6 (c) มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 3 (d) ไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 3



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium model (CD_{eq}) และ Two-site model (TSM) จาก กราฟBreakthrough ของ สังกะสีและแคดเมียม (a) สังกะสีประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 6 (b) แคดเมียมประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ pH 6

หลังจากการอธิบายข้อมูลจากการทดลองสังกะสีที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์โดย HYDRUS-1D พารามิเตอร์ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ของฟรุนดริช (Freundlich constants, K_F) ของแบบจำลอง Equilibrium model เพิ่มขึ้นจาก 3.42 เป็น 3.49 เช่นเดียวกับ Nonequilibrium model ก็เพิ่มจาก 2.46 เป็น 3.02 และ ค่า $1/n$ ที่ลดลงจาก 0.67 เป็น 0.33 เมื่อค่าพีเอชเพิ่มจากพีเอช 3 เป็น 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chotpanarat และ Kiatvarangkul, 2018 พบว่าค่า K_F เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น

จาก 3 เป็น 8 ค่า $1/n$ ที่ลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยค่า K_f เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เพิ่มมากขึ้น

นอกจากนั้นได้นำข้อมูลจากการทดลองสังกะสีและแคดเมียมที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ มาฟิตข้อมูลด้วยโปรแกรม โดยโปรแกรม HYDRUS-1D พบว่า ค่า K_f สังกะสีมีค่ามากกว่าแคดเมียมทั้ง 2 แบบจำลอง และ ค่า K_f ของสังกะสีและแคดเมียมในการทดลองแบบผสมของทั้งสองโลหะหนักมีค่าน้อยกว่าค่า K_f ของการทดลองที่ประกอบด้วยโลหะหนักเพียงชนิดเดียว (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Equilibrium (Eq) และ Non-equilibrium (TSM) จากการคำนวณโดยโปรแกรม HYDRUS-1D

คอลัมน์ ที่	พี เอช	โลหะ หนัก	MC ¹	Equilibrium model				Non-equilibrium model					
				K_f	$1/n$	RMSE	R^2	K_f	$1/n$	f	α (day-1)	RMSE	R^2
1	6.24	Zn	+	3.49	0.499	0.68	0.97198	3.02	0.33	0.74	0.0099	0.8369	0.9521
			-	3.47	0.33	1.14	0.90816	4.93	0.27	0.11	0.0264	1.0730	0.9189
2	3.46	Zn	+	3.42	0.78	1.00	0.96657	2.47	0.67	0.86	0.0101	1.0190	0.9462
			-	4.12	0.10	1.34	0.91602	4.31	0.97	0.96	0.0158	1.3470	0.9177
3	6.21	Zn	+	2.73	0.48	0.20	0.99353	2.62	0.73	0.93	0.0083	0.2714	0.9814
		Cd	+	2.36	0.53	0.13	0.99473	2.32	0.74	0.83	0.0096	0.2084	0.9840
4*	6.00	Cd	+	3.78	0.65		0.9903	3.14	0.77	0.90	0.008	-	0.9777

*อ้างอิงจาก Chotpantarat และ Kiatvarangkul (2018)

¹MC = (+) มี หรือ (-) ไม่มีของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

ผลของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง TSM ของสังกะสีที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่พีเอช 6 และพีเอช 3 และแบบจำลอง TSM ของแคดเมียมที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่พีเอช 6 มีค่า R^2 น้อยกว่าผลของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง EQ ของสังกะสีที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่พีเอช 6 และพีเอช 3 และแบบจำลอง Eq ของแคดเมียมที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่พีเอช 6

(ตารางที่ 4.11) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Chotpantararat และ Kiatvarangkul (2018) ที่พบว่า ค่า R^2 ของแบบจำลอง TSM ของแคดเมียมที่ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่พีเอช 6 น้อยกว่าผลของแบบจำลองพบว่าแบบจำลอง Eq จากข้อมูลที่แสดงในตาราง 4.5 พบว่ามี แบบจำลอง CD_{eq} มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลอง TSM ทั้งกรณีที่มีโลหะหนักเพียงอย่างเดียวและมีการผสมโลหะหนัก 2 ชนิดมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นองค์ประกอบ

โดยสาเหตุที่มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากขนาดของอนุภาคคอลลอยด์และประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จากงานวิจัยของ บัณฑิตา ราชานาค, 2019 พบว่า อนุภาคคอลลอยด์ที่วัดได้จากเครื่อง Malvern Zetasizer Nano มีขนาดลดลงจาก 487 นาโนเมตร เป็น 190.80 นาโนเมตร และประจุลบบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นจาก -6.56 มิลลิโวลต์ เป็น -13.10 มิลลิโวลต์ (ตารางที่ 4.6) เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากพีเอช 3 เป็น 8 ทำให้ความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่เป็นประจุบวกได้ดีขึ้น เมื่อสังกะสีติดอยู่บนผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มากขึ้น ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เมื่อไหลผ่านคอลลัมน์ จึงพาสังกะสีออกมามากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.6 ค่า Zeta potential และ ขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์*

คอลัมน์ที่	พีเอช	Zeta potential (มิลลิโวลต์)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	3.09	-6.56 ± 3.32	487.00 ± 21.24
2	6.01	-8.14 ± 1.50	238.20 ± 42.74
3	8.04	-13.10 ± 1.49	190.80 ± 38.05

*อ้างอิงจาก ราชานาค,2019

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะ (Facilitator) ในคอลัมน์ทรายอิมิตัวที่ค่าพีเอช 3 และ 6 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าพีเอชของสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และสังกะสีมีผลต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีผ่านคอลัมน์ทรายอิมิตัวให้เคลื่อนที่เร็วออกมาเร็วขึ้น โดยดูจากค่า Retardation factor ของสังกะสีที่พีเอช 3 การเคลื่อนที่ของ Total Zn เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Zn 8.85 %
ที่พีเอช 6 การเคลื่อนที่ของ Total Zn เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Zn 38.69 %
2. เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสังกะสีที่ออกมาจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น
3. เมื่อมีสังกะสีและแคดเมียมอยู่ในสารละลายเดียวกัน โลหะทั้งสองจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมิตัวช้าลงโดยดูจากค่า Retardation factor ของสังกะสีและแคดเมียม ควรเทียบกับ Single Zn และ Single Cd ด้วย
การเคลื่อนที่ของ Total Zn ช้ากว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Zn 1.23 %
การเคลื่อนที่ของ Total Cd ช้ากว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Cd 1.57 %
4. สังกะสีเคลื่อนที่เร็วกว่าแคดเมียม 9.13 %

จึงสรุปได้ว่ามอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีผลทำให้สังกะสีเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีและแคดเมียมลดลงเมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิดนี้ผสมอยู่ในสารละลายเดียวกันโดย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาครั้งนี้เน้นศึกษาเฉพาะผลของค่าพีเอชต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในสารละลาย แต่ในสภาพแวดล้อมจริงแล้ว มีปัจจัยอื่นๆ ที่สามารถส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนักเหล่านี้และการกระจายตัวของคอลลอยด์ เช่น อัตราการไหลของน้ำ ค่าความแรงไอออน ปริมาณโลหะ ปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ จุลินทรีย์และอุณหภูมิ

2. ควรทำการทดลองเพิ่มเติมในส่วนของพีเอช 3 ของสารละลายที่ประกอบด้วยสังกะสีและแคดเมียมที่มีมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบและควรทำการทดลองเพื่อดูการเคลื่อนตัวของสังกะสีและแคดเมียมที่ค่าพีเอชต่างๆ เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบในสารละลาย เพื่อสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเพิ่มมากขึ้น

3. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเท่านั้น อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปว่าควรศึกษาคอลลอยด์จริงจากสิ่งแวดล้อม และคอลลอยด์อื่นๆ หรือรวมผลของโลหะอื่นๆ ที่อาจพบร่วมกับสังกะสีและแคดเมียม เช่น As Hg และ Pb

เอกสารอ้างอิง

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Sarzanini, C. and Mentasti, E., 2003. Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances. *Water Research* 37, 1619-1627.
- ATSDR. Public health statement Zinc; CAS 7440-66-6; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Department of health and human service; Atlanta, GA, 2005; <https://www.atsdr.cdc.gov/>.
- Avkopashvili, G., Gongadze, A., Gakhokidze, R. and Avkopashvili, M., 2017. Phytoremediation of contaminated soils , contaminated with heavy metals from gold mine in Georgia. *Proceedings of International Conference “Applied Ecology: Problems, Innovations”*, 154-157.
- Bhattacharyya, K.G. and Gupta, S.S., 2008. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review. *Advances in Colloid and Interface Science* 140, 114-131.
- Chotpanarat, S. and Kiatvarangkul, N., 2018. Facilitated transport of cadmium with montmorillonite KSF colloids under different pH conditions in water-saturated sand columns: Experiment and transport modeling. *Water Research* 146, 216-231
- Humelnicu, D., Ignat, M. and Sucheai, M., 2015. Evaluation of Adsorption Capacity of Montmorillonite and Aluminium-pillared Clay for Pb²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺. *Acta Chim. Slov* 62, 947-957.
- Kim, J. I., 1991. Actinide colloid generation in groundwater *Radiochem Acta* 52/53, 71-81.
- Kretzschmar, R.M., Borkevec, M., Grolimund, D. and Elimelech, M., 1999. Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport. *Advances in Agronomy* 66, 121-193.
- Lee, Seyong, Il-Won Ko, In-Ho Yoon, Dong-Wook Kim, and Kyoung-Woong Kim., 2018. Colloid Mobilization and Heavy Metal Transport in the Sampling of Soil Solution from Duckum Soil in South Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, March.

- McCarthy, J. F. and McKay, L. D., 2004. Colloid transport in the subsurface: past, present, and future challenges. *Vadose Zone Journal* 3, 326-337.
- McGechan, M. B. and Lewis, D. R., 2002. Transport of particulate and colloid-sorbed contaminants through soil, Part 1: general principles. *Biosystems Engineering* 83, 255-273.
- Ming, H., Naidu, R., Sarkar B., Lamb, D. T., Lui, Y., Megharaj, M. and Sparks, D., 2016. Competitive sorption of cadmium and zinc in contrasting soils . *Geoderma* 268 , 60-68
- Mohankumar, K., Hariharan, V. and Prasada, R., 2016. Heavy Metal Contamination in Groundwater around Industrial Estate vs Residential Areas in Coimbatore, India. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 5-7.
- Singh, J. and Kalamdhad, A. S., 2011. Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life. *International Journal of Research in Chemistry and Environment* 1, 15-21.
- Sun, H., Gao, B., Tain, Y., Yin, X., Yu, C., Wang, Y. and Ma, L. Q., 2010. Kaolinite and lead in saturated porous media: Facilitated and impeded transport. *Journal of environmental engineering* 136 (11), 1305-1308.
- USEPA. National primary drinking water standards; EPA 816-F-09-004; United States Environmental Protection Agency, Office of Water: Washington, DC, 2009; <http://www.epa.gov/safewater>.
- Walshe, G. E., Pang, L., Flury, M., Close, M. E. and Flintoft, M., 2010. Effects of pH, ionic strength, dissolved organic matter, and flow rate on the co-transport of MS2 bacteriophages with kaolinite in gravel aquifer media. *Water Research* 22, 1255-1269.
- Wikiniyadhane, R., Chotpantararat, S., and Ong, S.K., 2015. Effects of kaolinite colloids on Cd²⁺ transport through saturated sand under varying ionic strength conditions: Column experiments and modeling approaches. *Journal of Contaminant Hydrology* 182: 146-156.

Zhu, J., Cozzolino V., Pigna ., Huang Q., Caporale A.G., Violante A., 2001. Sorption of Cu, Pb and Cr on Na-montmorillonite: Competition and effect of major elements. Chemosphere 84, 484–489.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2549. การศึกษาวิจัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน พื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.กรุงเทพมหานคร

บัญญัติตา ราชานาค. 2562. ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมิตัว

ศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).[ออนไลน์].

แหล่งที่มา: http://science.skru.ac.th/ShowToolCame.php?id_skru=SKRU0987654321.

[13 พฤษภาคม 2563]

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. UV/VIS Spectroscopy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

https://www.nanotec.or.th/th/?page_id=575. [13 พฤษภาคม 2563]

ภาคผนวก

ผลการทดลองจากคอลัมน์

ผลต่อการเคลื่อนตัวของสังกะสีและสังกะสีกับแคดเมียมโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยต์ในคอลัมน์ทราย
อิมตัวที่ค่าพีเอช 3 และ 6

ตารางที่ ก.1 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีของคอลัมน์ pH=3

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	Conc. Dissolved Zn (ppm)	Total Zn/C ₀ *	Dissolved Zn/C ₀ **
2	1	2.758	2.472	0.2758	0.2472
4	2	2.788	2.43	0.2788	0.243
6	3	7.026	5.408	0.7026	0.5408
8	4	8.818	8.16	0.8818	0.816
10	5	9.268	9.66	0.9268	0.966
12	6	9.424	9.648	0.9424	0.9648
14	7	9.432	9.852	0.9432	0.9852
16	8	9.454	9.924	0.9454	0.9924
18	9	9.466	9.79	0.9466	0.979
20	10	9.642	9.968	0.9642	0.9968
22	11	9.816	9.84	0.9816	0.984
24	12	9.926	9.266	0.9926	0.9266
26	13	9.97	9.986	0.997	0.9986
28	14	9.808	9.886	0.9808	0.9886
30	15	9.95	10.2	0.995	1.02
32	16	10.106	10.384	1.0106	1.0384
34	17	10.078	9.902	1.0078	0.9902
36	18	10.118	9.966	1.0118	0.9966
38	19	10.284	9.888	1.0284	0.9888
40	20	10.126	9.876	1.0126	0.9876
42	21	10.202	9.984	1.0202	0.9984
44	22	9.934	9.504	0.9934	0.9504

46	23	10.15	9.738	1.015	0.9738
48	24	10.706	10.38	1.0706	1.038
50	25	5.678	5.694	0.5678	0.5694
52	26	6.062	5.344	0.6062	0.5344
54	27	5.962	5.66	0.5962	0.566
56	28	5.738	5.506	0.5738	0.5506
58	29	5.942	5.636	0.5942	0.5636
60	30	6.146	5.728	0.6146	0.5728
62	31	6.054	4.669	0.6054	0.4669
64	32	6.61	4.624	0.661	0.4624
66	33	6.126	4.74	0.6126	0.474
68	34	5.722	4.684	0.5722	0.4684
70	35	6.026	4.721	0.6026	0.4721

หมายเหตุ : *C₀ ของ Total Zn เท่ากับ 10 ppm , **C₀ ของ Dissolved Zn เท่ากับ 9.89

ตารางที่ ก.2 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีของคอลัมน์ pH=6

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	Conc. Dissolved Zn (ppm)	Total Zn/C ₀ *	Dissolved Zn/C ₀ **
2	1	0.644	0.106	0.0644	0.013607
4	2	1.124	0.081	0.1124	0.010398
6	3	3.716	2.533	0.3716	0.32516
8	4	7.24	4.873	0.724	0.625546
10	5	8.116	6.942	0.8116	0.891142
12	6	9.312	7.068	0.9312	0.907317
14	7	9.316	8.04	0.9316	1.032092
16	8	9.552	9.686	0.9552	1.243389
18	9	9.592	8.24	0.9592	1.057766
20	10	9.18	9.24	0.918	1.186136
22	11	12.664	9.95	1.2664	1.277279
24	12	10.044	8.014	1.0044	1.028755

26	13	9.104	7.718	0.9104	0.990757
28	14	9.3	8.11	0.93	1.041078
30	15	9.004	8.048	0.9004	1.033119
32	16	9.552	5.176	0.9552	0.664442
34	17	9.26	7.106	0.926	0.912195
36	18	7.028	8.218	0.7028	1.054942
38	19	9.432	7.626	0.9432	0.978947
40	20	10.368	7.108	1.0368	0.912452
42	21	9.108	6.946	0.9108	0.891656
44	22	9.58	7.02	0.958	0.901155
46	23	8.96	6.906	0.896	0.886521
48	24	14.76	3.404	1.476	0.43697
50	25	4.54	1.19	0.454	0.15276
52	26	1.628	0.65	0.1628	0.08344
54	27	1.044	0.426	0.1044	0.054685
56	28	0.824	0.372	0.0824	0.047754
58	29	1.124	0.294	0.1124	0.037741
60	30	0.84	0.196	0.084	0.02516
62	31	0.716	0.164	0.0716	0.021053
64	32	0.62	0.18	0.062	0.023107
66	33	0.968	0.146	0.0968	0.018742
68	34	0.52	0.141	0.052	0.0181
70	35	0.58	-	0.058	-

หมายเหตุ : *C₀ ของ Total Zn เท่ากับ 10 ppm , **C₀ ของ Dissolved Zn เท่ากับ 7.79

ตารางที่ ก.3 ความเข้มข้นของสังกะสีของคอลัมน์ pH=6 ที่มีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบ

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	Conc. Dissolved Zn (ppm)	Total Zn/C ₀ *	Dissolved Zn/C ₀ **
2	1	0.356	0.346	0.0712	0.086098
4	2	0.494	0.287	0.0988	0.071417
6	3	0.506	0.296	0.1012	0.073656
8	4	4.098	3.821	0.8196	0.950813
10	5	4.466	4.071	0.8932	1.013023
12	6	4.524	4.151	0.9048	1.03293
14	7	4.462	4.107	0.8924	1.021981
16	8	4.538	4.256	0.9076	1.059058
18	9	4.408	4.06	0.8816	1.010285
20	10	4.51	3.945	0.902	0.981669
22	11	4.454	3.953	0.8908	0.98366
24	12	4.676	3.804	0.9352	0.946583
26	13	4.47	2.42	0.894	0.60219
28	14	4.446	2.242	0.8892	0.557896
30	15	4.422	2.413	0.8844	0.600448
32	16	4.33	2.264	0.866	0.563371
34	17	4.474	2.235	0.8948	0.556155
36	18	4.36	2.287	0.872	0.569094
38	19	4.436	1.977	0.8872	0.491954
40	20	4.362	1.975	0.8724	0.491457
42	21	4.268	2.398	0.8536	0.596715
44	22	4.198	4.116	0.8396	1.02422
46	23	4.066	4.116	0.8132	1.02422
48	24	2.374	2.772	0.4748	0.689781
50	25	1.136	1.25	0.2272	0.311048
52	26	0.628	0.624	0.1256	0.155275

54	27	0.53	0.438	0.106	0.108991
56	28	0.444	0.352	0.0888	0.087591
58	29	0.458	0.35	0.0916	0.087094
60	30	0.448	0.34	0.0896	0.084605
62	31	0.474	0.372	0.0948	0.092568
64	32	0.458	0.352	0.0916	0.087591
66	33	0.444	0.36	0.0888	0.089582
68	34	0.426	0.334	0.0852	0.083112
70	35	0.46	0.334	0.092	0.083112

หมายเหตุ : *C₀ ของ Total Zn เท่ากับ 5 ppm , **C₀ ของ Dissolved Zn เท่ากับ 4.02

ตารางที่ ก.4 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมของคอลัมน์ pH=6 ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Cd (ppm)	Conc. Dissolved Cd (ppm)	Total Cd/C ₀ *	Dissolved Cd/C ₀ **
2	1	0.038	0.03	0.0076	0.0075
4	2	0.054	0.034	0.0108	0.0085
6	3	0.05	0.034	0.01	0.0085
8	4	2.996	3.524	0.5992	0.881
10	5	3.072	3.992	0.6144	0.998
12	6	3.16	3.886	0.632	0.9715
14	7	3.076	3.892	0.6152	0.973
16	8	3.156	3.946	0.6312	0.9865
18	9	3.15	3.948	0.63	0.987
20	10	3.226	3.92	0.6452	0.98
22	11	3.118	3.826	0.6236	0.9565
24	12	3.284	3.906	0.6568	0.9765
26	13	3.184	4.112	0.6368	1.028
28	14	3.182	4.01	0.6364	1.0025
30	15	3.21	3.984	0.642	0.996

32	16	3.09	4.146	0.618	1.0365
34	17	3.154	4.128	0.6308	1.032
36	18	3.076	4.136	0.6152	1.034
38	19	3.126	4.202	0.6252	1.0505
40	20	3.242	3.39	0.6484	0.8475
42	21	3.15	3.258	0.63	0.8145
44	22	3.102	1.99	0.6204	0.4975
46	23	3.104	0.74	0.6208	0.185
48	24	1.878	0.298	0.3756	0.0745
50	25	0.662	0.144	0.1324	0.036
52	26	0.272	0.122	0.0544	0.0305
54	27	0.154	0.07	0.0308	0.0175
56	28	0.1	0.124	0.02	0.031
58	29	0.088	0.078	0.0176	0.0195
60	30	0.084	0.098	0.0168	0.0245
62	31	0.062	0.06	0.0124	0.015
64	32	0.082	0.07	0.0164	0.0175
66	33	0.074	0.038	0.0148	0.0095
68	34	0.094	0.03	0.0188	0.0075
70	35	0.098	0.034	0.0196	0.0085

หมายเหตุ : *C₀ ของ Total Cd เท่ากับ 5 ppm , **C₀ ของ Dissolved Cd เท่ากับ 4.00

ตารางที่ ข.1 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีทั้งหมดของคอลัมน์ pH=3 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
2	1	2.578	0	0
4	2	2.788	0	0
6	3	7.026	7.07908	7.80379
8	4	8.818	9.6109	9.06922
10	5	9.268	9.64561	9.23136
12	6	9.424	9.64645	9.33913
14	7	9.432	9.64647	9.41878
16	8	9.454	9.64647	9.47764
18	9	9.466	9.64647	9.52133
20	10	9.642	9.64647	9.5537
22	11	9.816	9.64652	9.57773
24	12	9.926	9.64648	9.59548
26	13	9.808	9.64648	9.60865
28	14	10.106	9.64647	9.61845
30	15	10.118	9.64649	9.62578
32	16	10.126	9.64647	9.63125
34	17	5.678	5.62652	6.44583

ตารางที่ ข.2 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายของคอลัมน์ pH=3 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
2	1	2.43	2.48E-21	0
4	2	5.408	6.88E-08	2.69E-16
6	3	8.16	8.04333	7.60029
8	4	9.66	9.8859	9.73307
10	5	9.648	9.89735	9.79745
12	6	9.852	9.89749	9.83527
14	7	9.924	9.89748	9.8587
16	8	9.79	9.8975	9.87329
18	9	9.968	9.8975	9.88238
20	10	9.84	9.89749	9.88807
22	11	9.986	9.89763	9.89158
24	12	9.886	9.89748	9.89385
26	13	10.2	9.89749	9.89523
28	14	10.384	9.8975	9.8961
30	15	9.902	9.8975	9.89667
32	16	9.966	9.89749	9.8971
34	17	9.888	9.8975	9.89722
36	18	9.876	9.89762	9.89723
38	19	9.984	9.89749	9.89733
40	20	9.504	9.8975	9.89736
42	21	5.694	5.12225	5.19799

ตารางที่ ข.3 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีทั้งหมดของคอลัมน์ pH=6 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
2	1	0.644	0	0.00E+00
4	2	1.124	0	0.00E+00
6	3	3.716	3.716	6.21266
8	4	7.24	7.24	8.40847
10	5	8.116	8.116	8.60167
12	6	9.312	9.312	8.7427
14	7	9.316	9.316	8.84793
16	8	9.18	9.18	9.18
18	9	9.104	9.18	9.104
20	10	9.004	9.004	9.004
22	11	9.26	9.26	9.26
24	12	9.108	9.108	9.108
26	13	8.96	8.96	8.96
28	14	4.54	4.54	4.54
30	15	1.628	1.628	1.628
32	16	0.62	0.62	0.62
34	17	0.52	0.52	0.52

ตารางที่ ข.4 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายของคอลัมน์ pH=6 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
2	1	0.106	0	1.66E-30
4	2	0.081	0	5.71E-30
6	3	2.533	0	4.13128
8	4	4.873	4.78834	5.73986
10	5	6.942	7.84972	6.66416
12	6	7.068	7.86814	7.18945
14	7	8.04	7.86842	7.48624
16	8	9.686	7.86844	7.65346
18	9	8.24	7.86843	7.74755
20	10	9.24	7.86844	7.80042
22	11	8.014	7.86836	7.83042
24	12	7.718	7.86846	7.84682
26	13	8.11	7.86844	7.85623
28	14	8.048	7.86844	7.8614
30	15	7.106	7.86844	7.8644
32	16	8.218	7.86843	7.86596
34	17	7.626	7.86845	7.86686
36	18	7.108	7.86838	7.8676
38	19	6.946	7.86844	7.86755
40	20	7.02	7.86844	7.86762
42	21	6.906	7.86845	7.8677
44	22	3.404	7.86844	7.86771
46	23	1.19	2.72353	1.85649
48	24	0.65	1.1635	1.27871
50	25	0.426	0.71146	0.96339
52	26	0.372	0.5048	0.75431

54	27	0.294	0.38783	0.60927
56	28	0.196	0.31306	0.50473
58	29	0.164	0.26133	0.42689
60	30	0.18	0.22353	0.36727
62	31	0.146	0.19477	0.32054
64	32	0.141	0.17218	0.28315

ตารางที่ ข.5 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีทั้งหมดในสารละลายสังกะสีและแคดเมียมของคอลัมน์ pH=6 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
2	1	0.356	0	0
4	2	0.494	0	0
6	3	0.506	0	0.64322
8	4	4.098	4.08137	4.2784
10	5	4.466	4.39205	4.33429
12	6	4.524	4.39826	4.34922
14	7	4.462	4.39844	4.36024
16	8	4.538	4.39844	4.36877
18	9	4.408	4.39844	4.37538
20	10	4.51	4.39844	4.38052
22	11	4.454	4.39847	4.38455
24	12	4.676	4.39844	4.3876
26	13	4.47	4.39844	4.38999
28	14	4.446	4.39844	4.39184
30	15	4.422	4.39844	4.39327
32	16	4.33	4.39844	4.39439
34	17	4.474	4.39844	4.39526

36	18	4.36	4.39847	4.39597
38	19	4.436	4.39844	4.39644
40	20	4.362	4.39844	4.39687
42	21	4.268	4.39844	4.39716
44	22	4.198	4.39844	4.39739
46	23	4.066	4.39844	4.39759
48	24	2.374	2.47271	3.0516
50	25	1.136	1.21447	1.67877
52	26	0.628	0.77041	1.10176
54	27	0.53	0.55266	0.7083
56	28	0.444	0.42497	0.25717
58	29	0.458	0.34166	0.26091
60	30	0.448	0.28335	0.2657
62	31	0.474	0.24043	0.25251
64	32	0.458	0.20763	0.23415
66	33	0.444	0.18184	0.21228
68	34	0.426	0.16108	0.19138
70	35	0.46	0.14405	0.17189

ตารางที่ ข.6 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในสารละลายสังกะสีและแคดเมียมของคอลัมน์ pH=6 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Zn (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
2	1	0.038	0	0
4	2	0.054	0	0
6	3	0.05	0	0.19616
8	4	2.996	2.73747	2.782
10	5	3.072	3.13297	2.91371

12	6	3.16	3.14255	2.97156
14	7	3.076	3.1429	3.01391
16	8	3.156	3.14291	3.04575
18	9	3.15	3.14292	3.06972
20	10	3.226	3.14292	3.08776
22	11	3.118	3.1429	3.10136
24	12	3.284	3.14291	3.11162
26	13	3.184	3.14292	3.11936
28	14	3.182	3.14291	3.12517
30	15	3.21	3.14291	3.12958
32	16	3.09	3.14292	3.13285
34	17	3.154	3.14292	3.13537
36	18	3.076	3.14289	3.13728
38	19	3.126	3.14291	3.13872
40	20	3.242	3.14292	3.13982
42	21	3.15	3.14292	3.14063
44	22	3.102	3.14292	3.14123
46	23	3.104	3.14292	3.14167
48	24	1.878	1.91474	2.32353
50	25	0.662	0.95756	1.30695
52	26	0.272	0.60592	0.87643
54	27	0.154	0.43234	0.60719
56	28	0.1	0.33056	0.25889
58	29	0.088	0.2643	0.0729
60	30	0.084	0.21805	0.16274
62	31	0.062	0.18412	0.17151
64	32	0.082	0.15828	0.15143
66	33	0.074	0.13803	0.1369
68	34	0.094	0.12178	0.12529
70	35	0.098	0.10849	0.11757
