



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ผลกระทบของมอด็มอริลโคโนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียม
ในคอลัมน์ทรายอิมตัว

โดย

นางสาวบัณฑิตา ราชานาค

เลขประจำตัวนิตินิต 5832721223

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียม
ในคอลัมน์ทรายอิมิตัว

นางสาวบัณฑิตา ราชานาค

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON FACILITATED-TRANSPORT CADMIUM
IN SATURATED SAND COLUMN

MISS BUNTHITA RACHANARK

A REPORT SUBMITTED IN PARTIALFULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF THE BACHELOR OF SCIENCE IN GEOLOGY DEPARTMENT OF
GEOLOGY, FACULTY OF SCIENCE, CHULALONGKORNUNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2018

เรื่อง ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของแคตเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัว

โดย นางสาวบัณฑิตา ราชานาค

สาขาวิชา ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

วันที่ส่ง 13 / พ.ศ. / 2562

วันที่อนุมัติ 13 / พ.ศ. / 2562

บัณฑิตา ราชานาค อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

Project Title IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON FACILITATED-
TRANSPORT CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN

By Miss Bunthita Rachanark

Field of study Geology

Advisor Assoc. Prof. Dr. Srilert Chotpantararat

Submitted date13 / 05 / 2019

Aproval date13 / 05 / 2019

Srilert Chotpantararat
..... Project Advisor
(Assoc. Prof. Dr. Srilert Chotpantararat)

บัณฑิตา ราชานาค : ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของ
แคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิ่มตัว (IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON
FACILITATED-TRANSPORT CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์, 41 หน้า

การวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียม โดยทดลองในคอลัมน์ที่บรรจุทรายอิ่มตัวซึ่งจำลองภายใต้การไหลภายใต้ชั้นน้ำบาดาลมีแรงดัน การทดลอง แบบคอลัมน์นี้ใช้แคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดความเร็วการไหลเท่ากับ 0.159 เซนติเมตรต่อนาที โดยการทดลองแบบคอลัมน์ ทำภายใต้ที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน (พีเอช 3 6 และ 8) จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากพีเอช 3 เป็นพีเอช 8 ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีประจุที่พื้นผิวเป็นลบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการดูดติดประจุบวกของแคดเมียมได้มากขึ้น ดังนั้นปริมาณแคดเมียมที่เคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์จึงเพิ่มขึ้นจาก 1.67 มิลลิกรัม เป็น 1.89 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 11.64 สำหรับค่าตัวประกอบความหน่วงของแคดเมียมพบว่ามีค่าลดลงจาก 3.71 เป็น 2.83 (ลดลงร้อยละ 23.62), 4.41 เป็น 3.07 (ลดลงร้อยละ 30.33) และ 5.51 เป็น 3.43 (ลดลงร้อยละ 37.83) ซึ่งทำให้มีค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของแคดเมียมเพิ่มขึ้นภายใต้ค่าพีเอช 3 6 และ 8 ตามลำดับ เนื่องจากผลของการมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในระบบการไหล ดังนั้นมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ช่วยส่งเสริมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชที่สูงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่เคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นจาก 10.59 มิลลิกรัม เป็น 13.40 มิลลิกรัม เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากพีเอช 3 ไปเป็นพีเอช 8 เนื่องจากค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีขนาดเล็กลง (ลดลงจาก 487.00 นาโนเมตรเป็น 190.80 นาโนเมตร) และ ประจุบนผิวของอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีค่าลดลงจาก -6.56 มิลลิโวลต์เป็น -13.10 มิลลิโวลต์ เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากพีเอช 3 ไปเป็นพีเอช 8 ตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์ SEM พบอนุภาค มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เกาะที่พื้นผิวทรายหลังจากให้มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคดเมียมไหล ผ่าน และพบธาตุเหล่านี้: อลูมิเนียม โซเดียม ซิลิกอน และออกซิเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

ภาควิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____ ภัณฑิตา ราชานาค
สาขาวิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษา _____ ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์
ปีการศึกษา _____ 2561 _____

5832721223: MAJOR GEOLOGY

KEYWORD: MONTMORILLONITE COLLOID / CADMIUM / GROUNDWATER / CADMIUM
TRANSPORT / PH

BUNTHITA RACHANARK : IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON
FACILITATED-TRANSPORT CADMIUM IN SATURATED SAND COLUMN)
ADVISORS : ASSOC. PROF. DR. SRILERT CHOTPANTARAT, 41 pp.

This study investigated the impacts of pH on co-transport of cadmium (Cd) and montmorillonite colloid through water-saturated sand column. The Cd-bearing montmorillonite was injected through the column containing saturated sand which was simulated as a groundwater flowing under pressure aquifer. Column experiment using 10 ppm of Cd mixed with 100 ppm of montmorillonite colloid. Cadmium and montmorillonite colloid solutions of different pH were pumped to the column in upward mode at a constant velocity of 0.159 cm/min. The column experiment was done under different pH conditions (3, 6 and 8). According to column experiments, the results revealed that the increase in Cd concentration in effluent from 1.67 mg. to 1.89 mg. (11.64% increase) when the pH value increased from pH 3 to pH 8. Moreover, retardation factors (R_f) of Cd increase with increasing pH. In addition, the presence of montmorillonite colloid decreased the R_f of Cd from 3.71 to 2.83 (23.62% decrease), 4.41 to 3.07 (30.33% decrease) and 5.51 to 3.43 (37.83% decrease), facilitating Cd movement under pH 3, 6 and 8, respectively. Therefore, montmorillonite colloid can promote the movement of Cd at the higher pH conditions. In addition, when increasing pH, the montmorillonite colloid passing through the column increased from 10.59 mg to 13.40 mg due to the decrease in size of particles (from 487.00 nm to 190.80 nm) and decrease of negative charge on the montmorillonite from -6.56 mV. to -13.10 mV. As per; SEM analysis, montmorillonite colloid was stucked onto the sand surface. This was indicated by the appearance of these elements: aluminum, sodium, silicon and oxygen.

Department _____ Geology _____ Student's Signature Bunthita Rachanark
Field of Study _____ Geology _____ Advisor's Signature Srilert Chotpantarot
Academic Year _____ 2018 _____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัย ซึ่งกรุณาใช้เวลาให้ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในด้านวิชาการและคุณธรรม รวมถึงประสบการณ์ต่างๆ และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลา 4 ในรั้วจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณพี่จ๊ะประภา เนียมปาน พี่บรรจง พวงทอง และพี่บุคลากรภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนางสาวฉันทนา อินทิม (พี่ปู) และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยการจัดการเหมืองสีเขียว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณนางสาวสาธิตา บุญแก้ววรรณ (พี่มิ่งค์) นายพงศธร ธีญญวัชรกุล (พี่หมิง) นางสาววิยะดา นิลกาญจนกุล (พี่ก้อย) และนางสาวกัญชลิษา แก้วสระแสน (พี่เป้) ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลอง รวมถึงให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมรุ่นที่ 59 พี่ น้องๆ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และคอยให้กำลังใจ ตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ผู้เป็นกำลังใจหลักในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และยังคงคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

บัณฑิตา ราชานาค

ผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมุติฐาน	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 แคดเมียม (Cd)	4
2.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	4
2.1.3 การดูดซับและการพาโลหะหนักเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์	5
2.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์	6
2.1.5 การดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์	7
2.2 ทฤษฎี	8
2.2.1 Retardation factor	8
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	10
3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	10
3.2 ออกแบบการทดลองและเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง	10
3.3 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	13
บทที่ 4 ผลการศึกษา	16
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ Montmorillonite K10 และทราย ottawa	16
4.2 ผลต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียมโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ ทรายอิมมั่วที่ค่าพีเอช 3 6 และ 8	17
4.3 พื้นผิวของเม็ดทราย	22

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	25
5.1 สรุปผลการศึกษา	25
5.2 ข้อเสนอแนะ	25
เอกสารอ้างอิง	27
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบออกไซด์ของ Montmorillonite K10	16
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อดูการเคลื่อนตัวของแคตเมียมในคอลัมน์ ทรายอิมตัวสำหรับค่าพีเอชต่างๆ ของสารละลาย	17
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคตเมียมที่ค่าพีเอชต่างๆ ของสารละลาย	17
ตารางที่ 4.4 Retardation factors ของการเคลื่อนที่ของแคตเมียม	20
ตารางที่ 4.5 ร้อยละของปริมาณแคตเมียมที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายอิมตัวที่ค่าพีเอชต่างๆ	20
ตารางที่ 4.6 ร้อยละของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายอิมตัวที่ค่าพีเอช ต่างๆ	21
ตารางที่ 4.7 ค่าศักย์ซีต้าและขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์	22

สารบัญญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์	5
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์	5
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมตัว	11
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมตัว	11
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเครื่องเครื่องอัลตราโซนิก	11
รูปที่ 3.4 ภาพภาชนะที่มีซิลิกาเจลอยู่ภายใน	11
รูปที่ 3.5 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์หลังตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง	12
รูปที่ 3.6 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์ที่อบแห้งหลังจากทำการปรับสภาพ	12
รูปที่ 3.7 ภาพเครื่อง Fraction Collector	14
รูปที่ 3.8 ภาพเครื่อง UV-Visible Spectroscopy	14
รูปที่ 4.1 รูปแบบ X-ray Diffraction ของ Montmorillonite K10	16
รูปที่ 4.2 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของ แคดเมียมกับปริมาตรรูพรุน	18
รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของแคดเมียมกับปริมาตรรู พรุนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3	18
รูปที่ 4.4 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของ แคดเมียมกับปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6	19
รูปที่ 4.5 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของ แคดเมียมกับปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8	19
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 8	21
รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของ Langmuir แสดงความสามารถในการดูดซับของมอนต์มอริลโล ไนต์ K10 ที่ค่า pH 3 6 และ 8	22
รูปที่ 4.8 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบน ทราย	23
รูปที่ 4.9 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบน ทราย ที่ค่าพีเอช 3	23
รูปที่ 4.10 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบน ทราย ที่ค่าพีเอช 6	24
รูปที่ 4.11 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบน ทราย ที่ค่าพีเอช 8	24

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โลหะหนักในดินและน้ำบาดาลหากมีปริมาณที่สูงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ เมื่อมนุษย์และสัตว์รับสัมผัสจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ (Gazso, 2001) แคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง มักปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมในปริมาณสูง (Srivastava and Singh, 2010; Idrees et. al, 2018) โดยแคดเมียมสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลจากการทำกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ การทำเหมืองโลหะ แบตเตอรี่แคดเมียมนิเกิล ปุ๋ยฟอสเฟต อุตสาหกรรมสี และอุตสาหกรรมโลหะผสม (Kadirvelu and Namasivayam, 2003) นอกจากนี้แคดเมียมยังพบได้ในธรรมชาติซึ่งปริมาณที่พบมีความสัมพันธ์กับแหล่งแร่ตะกั่ว แร่สังกะสี และแร่ทองแดง (Forstner and Whittmann, 1981) สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency : EPA) ได้กำหนดค่ามาตรฐานแคดเมียมที่ยอมรับได้ในน้ำดื่มที่ปริมาณไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร (USEPA, 2001) แต่อย่างไรก็ตามแคดเมียมสามารถเคลื่อนที่และตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งพืชอาจดูดซับเข้าไปสะสมในส่วนต่างๆได้ ส่งผลให้เกิดการถ่ายทอดสารพิษเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และสุดท้ายมนุษย์คือผู้ที่ได้รับผลกระทบนี้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (Ciećko et al., 2004)

สำหรับการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในน้ำบาดาลมักมีที่มาจาก การชะล้างจากผิวดินลงสู่ใต้ดิน ส่วนหนึ่งของแคดเมียมจะแพร่กระจายไปตามช่องว่างของชั้นหิน และบางส่วนถูกดูดซับไว้บนอนุภาคคอลลอยด์ (Walshe et al., 2010; Yuan and Peng, 2017; Yasutaka et al., 2017) โดยอนุภาคคอลลอยด์สามารถพบได้ทั้งในดินและในชั้นน้ำบาดาล (Sun et al., 2010) โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1 นาโนเมตรและ 10 ไมโครเมตร (Kretzschmar et al., 1999) พบว่าความเข้มข้นตามธรรมชาติของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำบาดาลมีค่า 108 ถึง 1,017 อนุภาคต่อลิตร (Kim, 1991) ความเข้มข้นของสารหนู (As) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ในสารละลายในดินเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) อลูมิเนียม (Al) และ โคบอลต์ (Co) ลดลงเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นอนุภาคคอลลอยด์จึงมีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก (Lee et al., 2018) ทำให้โลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของ

อนุภาคคอลลอยด์บางชนิดสามารถเคลื่อนที่ในระบบน้ำบาดาลความเร็วที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักในระบบน้ำบาดาลเดียวกันได้ (McGechan and Lewis, 2002)

จากการศึกษาของ Bhattacharyya และ Gupta (2008) พบว่าการดูดซับโลหะหนัก ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และนิกเกิล (Ni) ของแร่เคโอลิไนต์ (kaolinite) มีความสามารถต่ำกว่าแรมมอนต์มอริลโลไนต์ โดยแรมมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่สูงมากถึง 32.7 มิลลิกรัม/กรัม เมื่อเทียบกับแร่เคโอลิไนต์ที่ดูดซับแคดเมียมได้ 9.9 มิลลิกรัม/กรัม นอกจากนี้การศึกษาของ Zhu และคณะ (2001) พบว่าความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) ของแรมมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพีเอช การดูดซับของทองแดง ตะกั่วและโครเมียมเพิ่มขึ้นจาก 28% 27% และ 74% เป็น 53% 76% และ 87% ตามลำดับเมื่อเพิ่มค่าพีเอชจาก 3.5 เป็น 6.5 นอกจากนี้จากการศึกษาของ Chotpantararat และ Kiatvarangkul (2018) พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่สูงขึ้นเมื่อมีค่าพีเอชที่สูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่ดี นอกจากนี้ปัจจัยทางด้านเคมีของน้ำมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของแร่ดังกล่าวด้วย

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการทดลองแบบกะ (batch experiment) ซึ่งเป็นการทดลองในระบบปิดที่มีความสมดุลทางเคมี แต่ยังไม่ได้นำถึงระบบการไหลของน้ำบาดาลที่อาจส่งผลต่อการดูดซับและการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในระบบน้ำบาดาลได้ ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัวภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัวภายใต้ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

1.3 สมมติฐาน

มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมตัวภายใต้ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของค่าพีเอชที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแคดเมียมของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการเคลื่อนที่ของแคดเมียมเนื่องจากอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ที่มีผลต่อการดูดซับในระบบที่มีค่าพีเอชที่แตกต่าง

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 แคดเมียม (Cd)

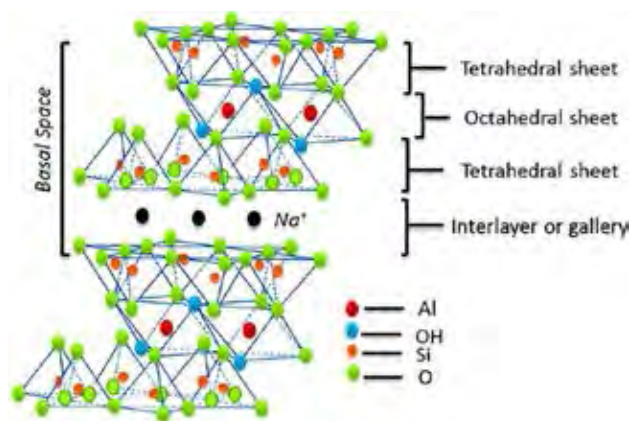
แคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง ซึ่งพบเป็นสารปนเปื้อนมากที่สุดในสิ่งแวดล้อม (Srivastava and Singh, 2010) องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดให้มีแคดเมียมไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร ในน้ำดื่ม (WHO, 1993) แคดเมียมที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมักพบสัมพันธ์กับแหล่งแร่สังกะสี ตะกั่วและทองแดง (Forstner and Whittmann, 1981) แคดเมียมยังอาจเกิดขึ้นได้จากการทำกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมเมตลิส อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่แคดเมียมนิกเกิล และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ทั้งนี้แคดเมียมยังอาจมาจากปุ๋ยฟอสฟอรัสซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของแคดเมียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม (Syers and Cisse, 2000) แคดเมียมบริสุทธิ์เป็นโลหะที่มีสีเงินขาวนวลซึ่งพบได้ยากตามธรรมชาติ แคดเมียมอาจทำให้เกิดอาการหลายอย่าง เช่น อาเจียนคลื่นไส้และโรคต่างๆ เช่น โรคปอด โรคไตไตโตและโรคกระดูกพรุน

2.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

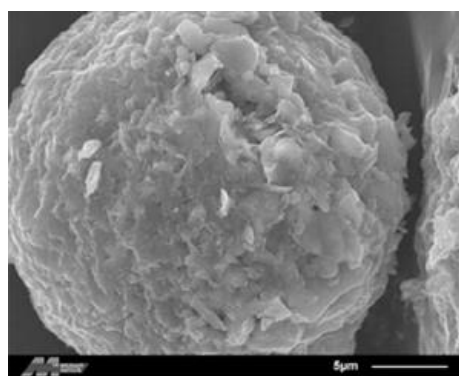
มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดิน (Clay mineral) ซึ่งมีการดูดซับที่ดีมาก บวกของไอออนอื่นๆ สามารถแลกเปลี่ยนได้ในชั้นเลเยอร์เพื่อความสมดุลกับประจุลบ มอนต์มอริลโลไนต์สามารถพบได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลก มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน เป็นส่วนประกอบของโคลนเจาะ (Drilling mud) และใช้ในการก่อสร้างเขื่อนดินเพื่อการกักเก็บน้ำในพื้นที่แห้งแล้ง นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุกันรั่วซึมสำหรับบ่อน้ำและหลุมฝังกลบต่างๆ สูตรของมอนต์มอริลโลไนต์ คือ $(\text{Si}_{7.8}\text{Al}_{0.2})^{\text{IV}}(\text{Al}_{3.4}\text{Mg}_{0.6})^{\text{VI}}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ และองค์ประกอบทางทฤษฎีแบบไม่มีไอออนอื่นๆ เข้ามาแทรกระหว่างชั้น คือ SiO_2 66.7%, Al_2O_3 28.3%, H_2O 5% สูตรข้างต้นระบุว่ามีการแทนที่ Si^{4+} โดย Al^{3+} ในชั้นเตตระฮีดรอนและ Al^{3+} ถูกแทนที่โดย Mg^{2+} ในชั้นออกตะฮีดรอน (Bhattacharyya and Gupta, 2008) เนื่องจากโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็กซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุลออกตะฮีดรอนอลูมิเนียมไฮดรอกซิล (Octahedral Aluminum Hydroxyl) อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิกาเตตระฮีดรอน (Silica Tetrahedral) โดยที่อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบ บนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกัน ในแร่มอนต์มอริลโลไนต์ตามธรรมชาติ ประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม โซเดียม

หรือแมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว มอนต์มอริลโลไนต์ดูดซับโลหะหนักผ่านสองกลไกที่แตกต่างกัน แบบแรกคือเกิดการดูดซับบนระนาบระหว่างชั้น (interlayer) ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์โดยเมื่อสัมผัสกับสารอื่น ๆ ที่มีไอออนบวกจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับไอออน (+) ที่อยู่ในระนาบระหว่างชั้น พร้อมกันนั้นก็แตกเปลี่ยนกับไอออน (+) ของสารเคมีอื่น ๆ ทันทันที และสำหรับการดูดซับแบบที่สองจะอยู่ที่ขอบของระนาบ ซึ่งจะผันแปรตามการก่อตัวที่ซับซ้อนผ่านกลุ่มซิลิกอนโมโนออกไซด์ (Si - O-) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al - O-) โดยกลไกทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสภาวะกรด ($\text{pH} < 4$) (Batchelor, 1998) ทั้งนี้ Abollino และคณะ (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการดูดซับโลหะหนัก เช่น แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ โดยใช้โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na-montmorillonite) ผลที่ได้พบว่าการดูดซับของโลหะหนักลดลงเมื่อมีค่าพีเอชลดลง เนื่องจากกลุ่มอลูมินอล (Aluminol) และกลุ่มซิลีนอล (Silanol) มีโปรโทเนต (Protonation) มากกว่า อีกสาเหตุก็คือปฏิกิริยาที่เกิดซับซ้อนบนพื้นผิวได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดของไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุบนพื้นผิวและไอออนที่ละลาย

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับของโลหะหนักของแร่มอนต์มอริลโลไนต์และแร่ดินเหนียวอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การใช้อิลไลต์ (Illite) ในการดูดซับแคดเมียม (II) (Echeverría et al., 2019) การใช้เบนทอนไนต์ (Bentonite) เพื่อดูดซับตะกั่ว (II) (Xu et al., 2008) มีการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักที่มีค่าไดวาเลนต์ เช่น แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และสารหนู (III) ในน้ำโดยใช้ตะกอนภูเขาไฟ (Scoria) (Kwon et al., 2010)



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์
(ที่มา : Rahman, 2016)



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์
(ที่มา : www.nazagroup2008.com)

2.1.3 การดูดซับและการพาโลหะหนักเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์

Zhu และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการดูดซับและการเคลื่อนที่ของทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) ของโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na-montmorillonite) ที่พีเอช 3.5 4.5 และ 5.5 โดยใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาความเข้มข้นที่แตกต่างกันของอลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) บนโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วย ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ทองแดงและโครเมียมมากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มค่าพีเอชในขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น การดูดซับของโลหะหนักในมอนต์มอริลโลไนต์จะถูกลบทิ้งเพราะการมีอยู่ของแคลเซียมและแมกนีเซียม ในขณะที่การมีอยู่ของอลูมิเนียมและเหล็กแสดงการดูดซับโลหะหนักรูปแบบที่แตกต่างออกไป โดยอะลูมิเนียมและเหล็กสามารถยับยั้งการดูดซับของโลหะหนักเมื่อค่าพีเอชต่ำหรือความเข้มข้นของธาตุอะลูมิเนียมและเหล็กค่อนข้างต่ำ

Bhattacharyya และ Gupta (2008) ใช้แร่เคโอลิไนต์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ในขณะที่มีความเป็นกรดเป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดแคดเมียม (II) จากน้ำในการทดลองแบบแบทช์โดยมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของแคดเมียม (II) เริ่มต้น ปริมาณของดิน ค่าพีเอช เวลาและอุณหภูมิ ผลการวิจัยพบว่าค่าการดูดซับของ Langmuir มีค่า 9.9 และ 32.7 มิลลิกรัม/กรัม⁻¹ สำหรับแร่เคโอลิไนต์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ตามลำดับ ซึ่งหากค่าการดูดซับของ Langmuir มีค่ามากจะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่มากตาม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแร่เคโอลิไนต์จึงมีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าแร่มอนต์มอริลโลไนต์ค่อนข้างมากสำหรับการดูดซับแคดเมียม (II) นอกจากนี้การดูดซับของแคดเมียม (II) ในดินนั้นได้รับอิทธิพลจากค่าพีเอชที่ต่างกันและปริมาณที่ดูดซับยังเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดต่ำลงเรื่อย ๆ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ตัวอย่างเช่น Tang และ Weisbrod (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของตะกั่ว (Pb) โดยมีอนุภาคคอลลอยด์ในรอยแตกของหิน ในการทดลองสารละลายถูกเตรียมโดยการเพิ่มมอนต์มอริลโลไนต์และฮิวมิกแอซิดลงในน้ำฝนเทียมที่มีส่วนผสมของตะกั่วละลายอยู่ ผลการทดลองพบว่าตะกั่วที่เคลื่อนที่ได้เฉพาะในสารละลายที่มีอนุภาคคอลลอยด์ดังกล่าว นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมจะส่งผลให้มีการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์ที่เข้าสู่รอยแตกในหินเพิ่มขึ้น

García (2010) ได้ศึกษาเสถียรภาพและการเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในระบบน้ำ โดยให้พีเอชของสารละลายแตกต่างกันออกไปที่ 4.5 6 และ 8.5 และกำหนดให้มีค่าความแรงไอออน (Ionic strengths) รวมเท่ากัน ผลการศึกษาพบว่าความเสถียรของคอลลอยด์มอนต์มอริลโลไนต์ลดลงเมื่อค่าความแรงไอออนสูงขึ้นและค่าพีเอชลดลง โดยอุณหภูมิมีผลกระทบร่วมกับทั้งสองตัวแปรนี้ด้วย

2.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์พบได้ทั่วไปในชั้นใต้ผิวดิน (Sen et al., 2004) และความเข้มข้นตามธรรมชาติของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำใต้ดินมีค่า 10^8 ถึง 10^{17} อนุภาคต่อลิตร (Kim, 1991) อนุภาคคอลลอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร (DeNovio et al., 2004) นอกจากนี้คอลลอยด์ตามธรรมชาติยังรวมไปถึงเศษดิน หิน แร่ และเศษสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ที่มีขนาดดังกล่าวด้วย (Posadas et al., 2001) และความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ที่พบได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปตามธรรมชาติมีค่าตั้งแต่ 35 ถึง 100 มิลลิกรัม/ลิตร (Zhuang et al., 2003)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีรูพรุนนั้นมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง การทดลองในคอลัมน์ในห้องปฏิบัติการเป็นที่นิยมมากที่สุดในการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ ตัวอย่างตัวกลางที่นิยม เช่น ทรายควอตซ์ การทดลองในคอลัมน์มีข้อดีคือสามารถควบคุมเงื่อนไขการทดลองได้และสามารถศึกษาแยกตัวแปรในระบบที่เราสนใจได้เช่นกัน (Ryan and Elimelech 1996) ข้อเสียหลักคือในระบบแบบจำลองเหล่านี้อาจไม่ได้มีความซับซ้อนเท่าระบบจริงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ค่าพีเอช (Ryan and Elimelech, 1996; Grolimund et al., 1998) ค่าความแรงไอออน (Ionic strength) (Ryan and Elimelech, 1996; Grolimund et al., 1998; Walshe et al., 2010) การทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเกลือที่ลดลงและค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น (Roy and Dzombak, 1996) จากรายงานของ Bunn และคณะ (2002) สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้น Ca^{2+} ต่ำลงและค่าพีเอชสูงขึ้น ทำให้อินทรีย์วัตถุมีการเคลื่อนย้ายออกมาจากดินได้มากขึ้น

ผลกระทบของพีเอชมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก ตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Aryal และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำฝน ผลการวิจัยพบว่าอนุภาคคอลลอยด์มีพฤติกรรมแตกต่างกันภายใต้สภาวะที่เป็นกรด กลางและเบส โดยที่สภาวะค่าพีเอชต่ำ ขนาดอนุภาคคอลลอยด์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและเกิดการรวมตัว

Patil (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของค่าพีเอชและความแรงไอออนต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของค่าพีเอชและค่าความแรงไอออนที่แตกต่างกันโดยมีอัตราการไหลของน้ำคงที่ในตัวกลางที่เป็นทรายควอตซ์ ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้มีการสะสมของคอลลอยด์ในคอลัมน์ลดลง เนื่องจากค่าพีเอชมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าประจุไฟฟ้าบน

พื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะสมจึงลดลงเมื่อมีสภาพความเป็นกรดลดลง นอกจากนี้ Garcia (2010) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพและการเคลื่อนที่ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ โดยให้ค่าพีเอชของสารละลายแตกต่างกันไปที่ 4.5 6 และ 8.5 และให้ค่าความแรงไอออนเท่ากัน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่าพีเอชลดลงและค่าความแรงไอออนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเสถียรของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความแรงของไอออนและค่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยจะมีประจุไฟฟ้าลบที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้การสะสมคอลลอยด์ยังขึ้นอยู่กับประจุบวก ตัวอย่างเช่นอัตราการสะสมคอลลอยด์จะสูงขึ้นเมื่อระบบได้รับไอออนบวกไดวาเลนต์ (Ca^{2+}) และโมนोไดวาเลนต์ (Na^+) (Kretschmar et al., 1999; Grolimund et al., 1998)

2.1.5 การดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์สามารถทำให้สารปนเปื้อนไปได้ไกลมากขึ้นหรืออาจชะลอการปนเปื้อนได้จากการดูดซับสารปนเปื้อนเหล่านั้นโดยขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคคอลลอยด์หรืออัตราการไหลของน้ำ ซึ่ง Ryan และ Elimelech (1996) พบว่าหลักเกณฑ์สำคัญในการเคลื่อนที่และดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์จะต้องมีความเสถียรและต้องมีอนุภาคคอลลอยด์ในปริมาณที่เพียงพอต่อการดูดซับโลหะหนักจำนวนมาก แหล่งที่มาของอนุภาคคอลลอยด์ในสภาพแวดล้อมใต้ผิวดินนั้นมีอยู่ตามธรรมชาติและสามารถนำอนุภาคคอลลอยด์เข้าสู่ใต้ผิวดินโดยตรงผ่านหลุมฝังกลบและการบำบัดน้ำเสีย (Kretschmar et al., 1999; Sen et al., 2002) การศึกษาของ Ibaraki และ Sudicky (1995) บอกถึงความแตกต่างระหว่างคอลลอยด์แท้ (True colloids) และคอลลอยด์ไม่แท้ (Pseudo colloids) พบว่าคอลลอยด์แท่นั้นมีต้นกำเนิดมาจากสารปนเปื้อน เช่น นิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) ซึ่งมีพลังงานสูงมากจนสามารถสร้างอนุภาคกัมมันตรังสีขึ้นใหม่ภายในนิวเคลียสหรือโดยผ่านการแปลงภายในก็ได้ เมื่อความเข้มข้นสูงกว่าความสามารถในการละลายก็จะตกตะกอน ส่วนคอลลอยด์ไม่แท้เกิดจากแหล่งที่ไม่ปนเปื้อน ตัวอย่างเช่น อนุภาคดินเหนียวซึ่งกลายเป็นสารปนเปื้อนเนื่องจากการดูดซับมลพิษบนพื้นผิว

การศึกษาของ Sen และคณะ (2002) กล่าวว่าในดินหรือน้ำใต้ดินมีอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีการเคลื่อนที่และการดูดซับสารปนเปื้อนสองรูปแบบในสภาพแวดล้อม โดยมีในรูปแบบของเหลวที่เคลื่อนที่และของแข็งที่ไม่เคลื่อนที่ Zhou และคณะ (2011) ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์ในธรรมชาติ ดังนั้นพวกเขาจึงศึกษาผลของค่าพีเอชและค่าความแรงไอออน (Ionic strength) ต่อการดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์ในคอลัมน์บรรจุทรายควอตซ์อิมิตัว มีงานวิจัยอีกหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ตัวอย่างเช่น Tang และ Weisbrod (2009) ศึกษาเกี่ยวกับผลของ

อนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนที่ของตะกั่ว (Pb) ในรอยแตกของหินโดยใช้แรมอนต์โมริลไลต์และกรดฮิวมิก (Humic acid) ในการเตรียมสารละลายที่จะใช้ในการทำฝนเทียมที่มีส่วนผสมของตะกั่ว ผลการวิจัยพบว่า ตะกั่วมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของอนุภาคคอลลอยด์ผ่านรอยแตกในเนื้อหินเหล่านั้น

2.2 ทฤษฎี

2.2.1 ค่า Retardation factor คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของสารปนเปื้อนต่อความเร็วของน้ำ ซึ่งสามารถบอกความเร็วการเคลื่อนที่ของการปนเปื้อนจากโลหะได้ โดยหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของข้อมูลจากการศึกษาไอออนของโลหะหนัก โดยการประมาณพื้นที่เหนือกราฟขาขึ้นของกราฟ Breakthrough จากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดที่มีความเข้มข้นสัมพันธ์ (C / C_0) เท่ากับ 1.0 (Nkedi-Kizza et al., 1987) โดยสามารถคำนวณค่า Retardation factor ได้จากสมการ :

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

โดยที่ C (mg / L) คือความเข้มข้นของน้ำทิ้ง C_0 (mg / L) อความเข้มข้นของอิทธิพลและ PV_1 คือจำนวนของปริมาตรรูพรุนที่ความเข้มข้นสัมพันธ์คือ 1.0

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลกระทบของอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของมลสาร การทำการทดลองในคอลัมน์ทรายอิมิตัว รายงานการปนเปื้อนแคดเมียมในประเทศไทย

3.2 ออกแบบการทดลองและเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง

มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) จาก SIGMA-ALDRICH มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ประมาณ 30 มิลลิอิควิวเลนซ์/100 กรัม และพื้นที่ผิวคือ 250 ลูกบาศก์เมตร/กรัม แร่มอนต์มอริลโลไนต์มีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pzc) ที่ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.0 ถึง 6.0 (Liu et al., 2008) มีการวิเคราะห์โดยใช้ X-ray diffraction (XRD) (Bruker AXS, Germany) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแร่และหาร้อยละของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ และใช้ X-ray fluorescence (XRF) (Bruker AXS, Germany). ในการตรวจสอบองค์ประกอบออกไซด์ โดยทั้ง XRD และ XRF ทำการวิเคราะห์ที่ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

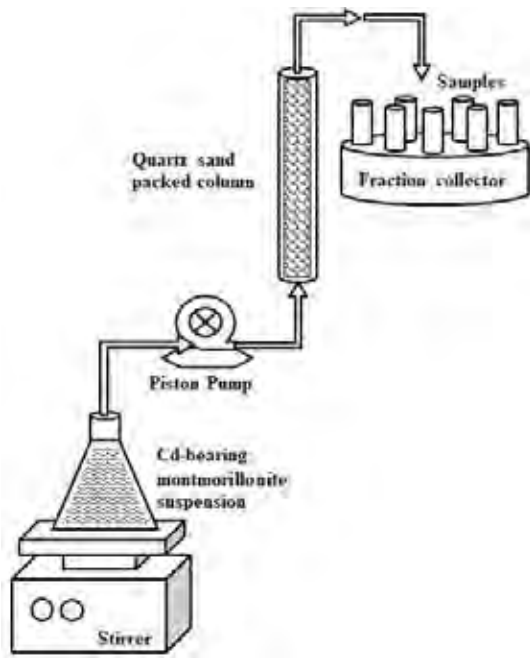
เม็ดทราย (Ottawa sand) ชื้อจาก Fisher Chemical มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม. ถึง 0.8 มม. โดยก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง มีการทำความสะอาดด้วย 0.01 M NaOH และ 0.01 M HNO₃ ตามลำดับเพื่อกำจัดโลหะออกไซด์และอนุภาคอื่น ๆ บนพื้นผิวทราย

สารละลายแคดเมียมเตรียมโดยการละลาย Cd(NO₃)₂·4H₂O(s) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M เพื่อให้มีความเข้มข้นของแคดเมียม 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลาย และใช้ HNO₃ และ NaOH ในการปรับค่าพีเอชของสารละลาย

3.2.2 การเตรียมคอลัมน์

ทำการทดลองคอลัมน์ตามการศึกษาของ Chotpantararat และ Kiatvarangkul (2018)

ใช้คอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 2.5 ซม. และยาว 10 ซม. (เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 3 ซม.) โดยของเหลวจะถูกสูบเข้าจากทางด้านล่างของคอลัมน์ ก่อนทำการทดลองต้องทำการล้างคอลัมน์ด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.01 M และ HNO₃ ความเข้มข้น 0.01 M และภายในคอลัมน์บรรจุด้วยทราย Ottawa ซึ่งเป็นทรายควอตซ์ทั่วไปมีค่าความพรุนยังผล (effective porosity) 0.32 และความหนาแน่น 1.43 กรัม / ซม.³ ในการบรรจุทรายแต่ละคอลัมน์ จะมีค่า 1 Pore volume (PVs) ประมาณ 15 ซม.³ และความเร็วในการไหลผ่านของของไหลมีความเร็วประมาณ 0.159 ซม. / นาที



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมตัว
(ที่มา : Wikiniyadhane, 2016)



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงคอลัมน์บรรจุทรายอิมตัว

3.2.3 การเตรียมทรายที่ใช้บรรจุในคอลัมน์

- 1) ล้างด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.01 M เป็นเวลา 30 นาทีโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก แล้วจึงล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- 2) ล้างด้วยสารละลาย HNO₃ ความเข้มข้น 0.01 M เป็นเวลา 30 นาทีโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก แล้วจึงล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- 3) อบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
- 4) เก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีซิลิกาเจลอยู่ภายในเพื่อดูดความชื้น



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเครื่องเครื่องอัลตราโซนิก

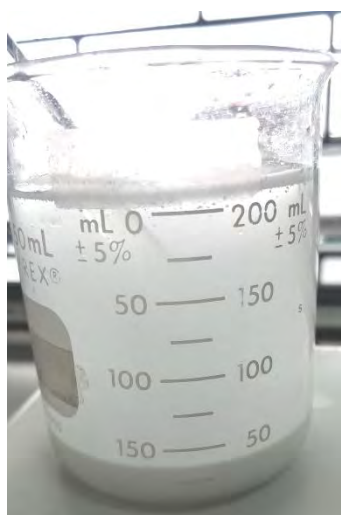


รูปที่ 3.4 ภาพภาชนะที่มีซิลิกาเจลอยู่ภายใน

3.2.4 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อใช้ในการทดลองคอลัมน์

ก่อนทำการทดลองต้องทำการปรับสภาพแรมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนนำมาใช้ทดลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ล้างมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) 20 กรัมด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- 2) สารละลายด้านบนซึ่งมีปริมาตรเป็นครึ่งหนึ่งของทั้งหมดจะถูกสูบขึ้นมา
- 3) อบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) อีกครั้ง และอบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) เติมแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 M ปริมาณ 400 มิลลิลิตรลงในมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) 20 กรัม แล้วเขย่าโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (หากปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ถึง 20 กรัมให้ปรับเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ให้เป็นไปตามอัตราส่วนข้างต้น)
- 6) แยกมอนต์มอริลโลไนต์ออกมาโดยวิธีการรินสารละลายใสออกจากตะกอน (Decantation)
- 7) ล้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) จนไม่มีคลอไรด์ไอออน (วัดค่า EC เท่ากับศูนย์เพื่อยืนยันว่าไม่มีคลอไรด์ไอออนแล้ว)
- 8) อบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
หลังตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 ภาพมอนต์มอริลโลไนต์ที่อบแห้ง
หลังจากทำการปรับสภาพ

3.2.5 การเตรียมสารละลายแคดเมียมไนเตรต

- 1) ตวงแคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 2.447 กรัม
- 2) ละลายในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M และปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีปริมาณแคดเมียม 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.6 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคดเมียม

- 1) เติมนอนต์มอริลโลไนต์ 400 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัม/ลิตร) ลงในขวดปริมาตร 500 มิลลิลิตรแล้วจึงวางในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- 2) เติมสารละลายแคดเมียมไนเตรต 5 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- 3) ปรับค่าพีเอชโดยการเติม NaOH ความเข้มข้น 0.1 M และ HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M
- 4) ปริมาตรสุดท้ายจะเป็น 500 มิลลิลิตรและความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์และแคดเมียมจะเท่ากับ 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.3 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.1 วิธีการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแคดเมียมโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

- 1) ก่อนใช้คอลัมน์ต้องทำการปรับเทียบความเข้มข้นด้วยน้ำปราศจากไอออน และใช้สารละลายปราศจากสารแคดเมียม (แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M) ที่มีค่าพีเอช 3 6 และ 8 อย่างน้อย 5 Pore volumes หรือจนกว่าสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์จะมีค่า พีเอช นั้น ๆ โดยจะมีค่าความแรงไอออน (ionic strength) 0.003 M (น้ำบาดาลโดยทั่วไปมีค่าความแรงไอออนประมาณ 0.003 M) เพื่อให้การไหลอยู่ในสถานะคงที่และปรับสภาพทางเคมีให้ใกล้เคียงกับมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคดเมียมที่ใช้ในการทดลอง
- 2) สารละลายแขวนลอยมอนต์มอริลโลไนต์ที่ประกอบด้วยแคดเมียมที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกันจะถูกคนด้วยเครื่อง stirrer ในขณะที่ถูกสูบขึ้นไปยังคอลัมน์ที่ค่าความเร็วคงที่ (0.159 เซนติเมตร/ นาที) เป็นปริมาตรประมาณ 21 Pore volume
- 3) หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนกลับมาเป็นแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M อีกครั้งจนครบทั้งหมด 35 Pore volume
- 4) สารละลายทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัวจะถูกเก็บไว้ในหลอดตามช่วงเวลาต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง Fraction Collector (เก็บตัวอย่างทุกครึ่งชั่วโมงจนครบเวลาที่สารละลายผ่านคอลัมน์จนครบ 35 Pore volume และจะใช้ตัวแทนของแต่ละ Pore volume ในการนำไปตรวจวัด)



รูปที่ 3.7 ภาพเครื่อง Fraction Collector

3.3.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว

ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัวจะสามารถตรวจสอบได้ด้วย เครื่อง UV-Visible Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร และจะใช้มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ (ความเข้มข้น 2 กรัม / ลิตร) เจือจางที่ค่าต่าง ๆ (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร) ในการทำเส้นโค้งการเปรียบเทียบ โดยทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ภาพเครื่อง UV-Visible Spectroscopy

3.3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัว

หลังจากทำการวัดความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์แล้ว ขั้นตอนถัดมาคือ การวัดความเข้มข้นของแคดเมียม โดยการตรวจวัดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แคดเมียมในสารละลายและแคดเมียมทั้งหมด ซึ่งแคดเมียมทั้งหมดคือแคดเมียมในสารละลายรวมกับแคดเมียมบนผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ โดยมีขั้นตอนการเตรียมและตรวจวัดดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย สามารถตรวจวัดได้โดย
 - 1.1) ปริมาณครึ่งส่วนจะถูกปั่นแยกที่ 9000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
 - 1.2) กรองผ่านกระบอกกรอง PTFE ที่ 0.22 ไมโครเมตร
 - 1.3) แคดเมียมที่ละลายวิเคราะห์โดยใช้ Atomic absorption spectroscopy (AAS, Perkin Elmer model AAnalyst 200)
- 2) ความเข้มข้นรวมของแคดเมียมทั้งหมด จะถูกกำหนดโดย
 - 2.1) ปริมาณครึ่งส่วนจะถูกเติมด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 16 M
 - 2.2) ให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสในตู้ดูดควัน
 - 2.3) ความเข้มข้นรวมของแคดเมียมวิเคราะห์โดยใช้ Atomic absorption spectroscopy (AAS, Perkin Elmer model AAnalyst 200)
- 3) ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดูดซับแคดเมียมจะถูกคำนวณเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นรวมของแคดเมียมทั้งหมดและความเข้มข้นของแคดเมียมที่ละลาย

3.3.5 การวิเคราะห์ขนาดและ Zeta potential ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

วิเคราะห์ขนาดของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และ Zeta potential ที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้เครื่อง Malvern Zetasizer Nano ที่คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์และ Zeta potential ซึ่งเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย

3.3.6 การวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)

ใช้เพื่อดูพื้นผิวของทรายและวิเคราะห์ธาตุต่างๆ บนวัตถุ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL, JSM-6610LV and Oxford, X-MaxN 50) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

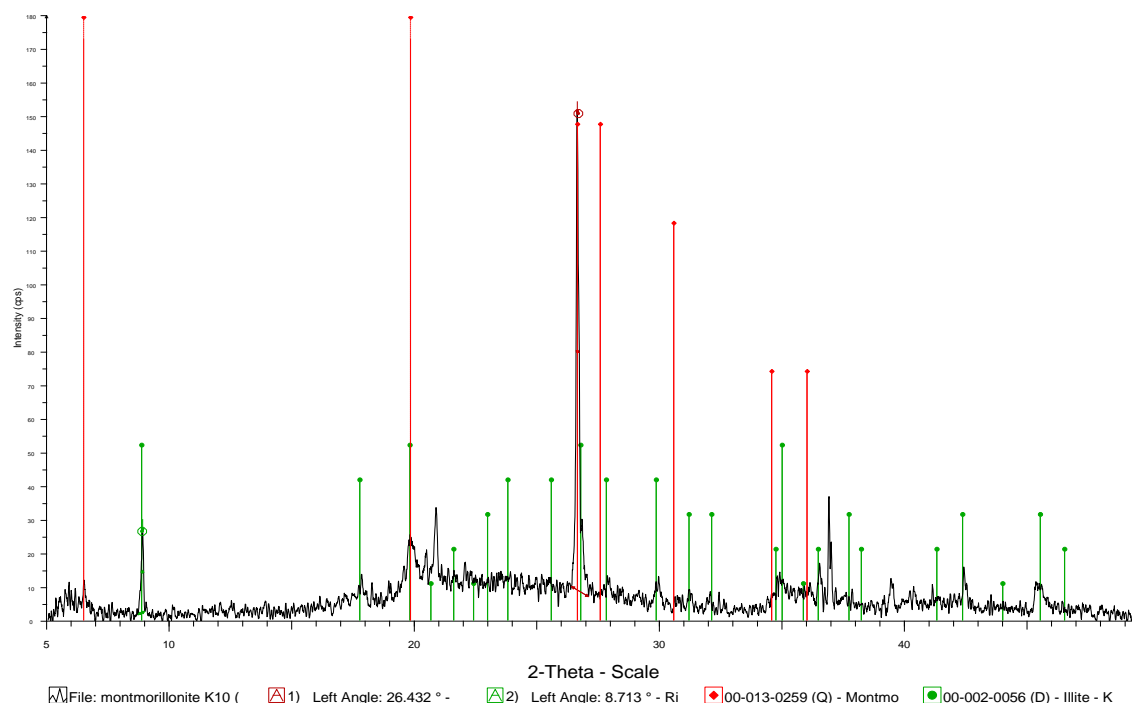
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ Montmorillonite K10 และทราย ottawa

ผลการศึกษา XRD แสดงให้เห็นว่า Montmorillonite K10 ประกอบไปด้วย Montmorillonite 88.86% และ Illite 11.14% (รูปที่ 4.1) นอกจากนี้ข้อมูลของ XRF สำหรับ Montmorillonite K10 แสดงว่า สารประกอบสำคัญของออกไซด์ใน Montmorillonite K10 คือ SiO_2 และ Al_2O_3 (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบออกไซด์ของ Montmorillonite K10

Constituents	Quantity (%)	Constituents	Quantity (%)
SiO_2	74.49	TiO_2	0.53
Al_2O_3	14.12	CaO	0.48
Fe_2O_3	2.77	Na_2O	0.15
K_2O	1.57	P_2O_5	0.03
MgO	1.50	LOI	4.36



รูปที่ 4.1 รูปแบบ X-ray Diffraction ของ Montmorillonite K10

4.2 ผลต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียมโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ที่ค่า

พีเอช 3 6 และ 8

มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคดเมียมถูกสูบเข้าไปในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์โดยมีค่าพีเอชของสารละลายที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียม ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของคอลัมน์ที่ใช้ในการทำการทดลองนี้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อดูการเคลื่อนตัวของแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์สำหรับค่าพีเอชต่างๆ ของสารละลาย

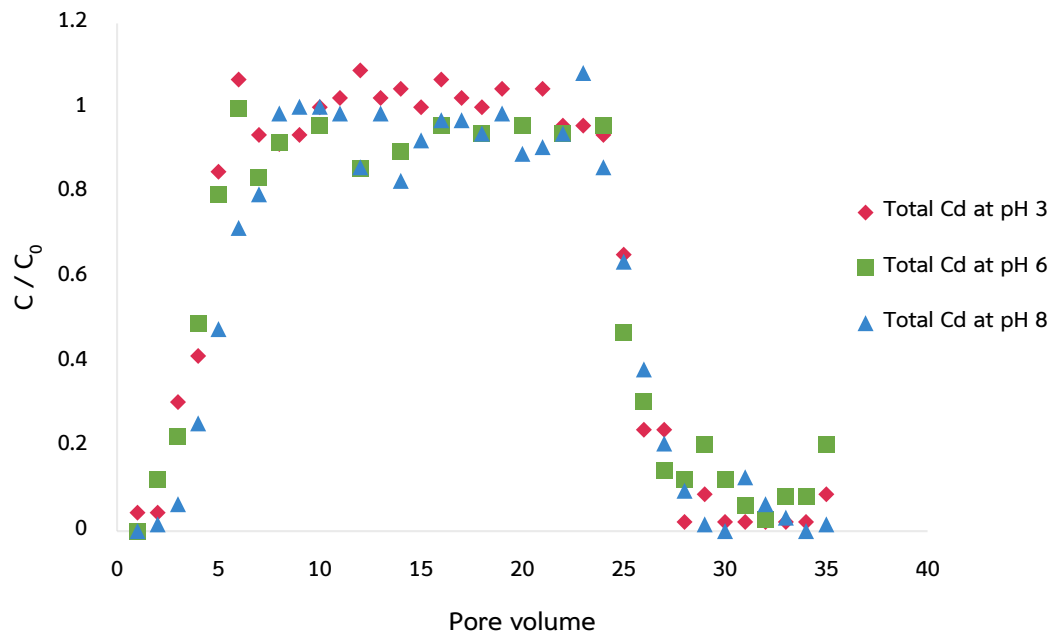
คอลัมน์ที่	ความยาว (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ หนาแน่นรวม (กรัม/ซม. ³)	ความพรุน (-)	ปริมาตรรู พรุน (ซม. ³)	ความเร็วในการ ไหลซึมผ่าน (เมตร/วัน)	พีเอช	ค่าความแรง ไอออน (มิลลิโมลาร์)
1	10.00	2.50	1.43	0.31	15.24	2.29	3.09	0.003
2	10.00	2.50	1.42	0.32	15.55	2.29	6.01	0.003
3	10.00	2.50	1.43	0.31	15.06	2.29	8.04	0.003

ในการทำการทดลองจะทำในคอลัมน์ที่มีขนาดเท่ากัน รวมไปถึงมีการตั้งค่าให้ความเร็วในการไหลผ่านเท่ากันทุกคอลัมน์ ทั้งนี้การบรรจุทรายลงในคอลัมน์โดยบรรจุโดยให้ทรายมีค่าความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้ผลการทดลองขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและไม่มีปัจจัยของความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของทรายของแต่ละคอลัมน์มารบกวน

ผลการเคลื่อนตัวของแคดเมียมในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ซึ่งมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะสามารถทราบได้จาก กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของแคดเมียมที่ค่าพีเอชต่างๆ (3 6 และ 8) กับปริมาตรรูพรุน (ในที่นี้หมายถึงปริมาตรสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ไป) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

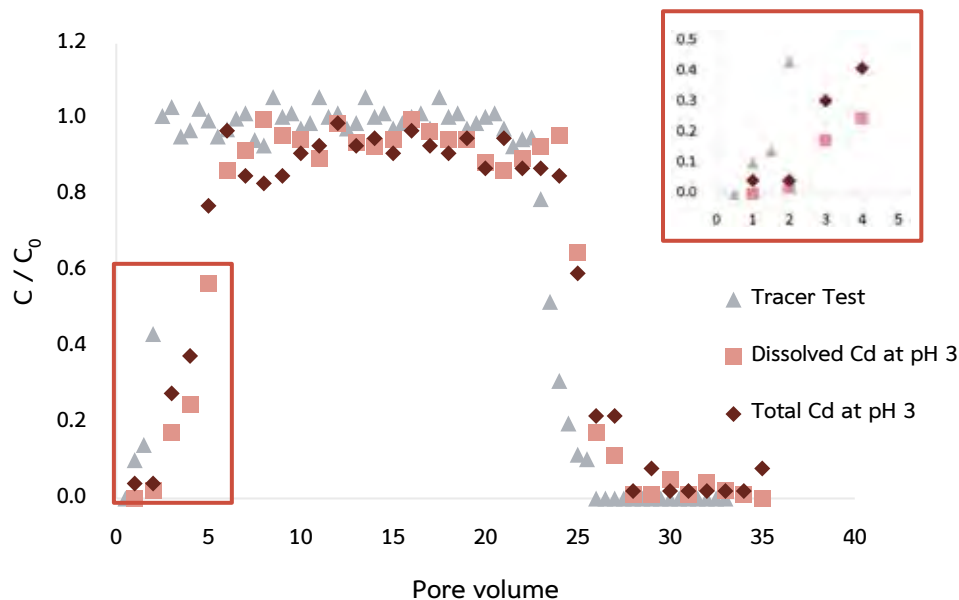
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมที่ค่าพีเอชต่างๆ ของสารละลาย

คอลัมน์ที่	พีเอช	แคดเมียมใน สารละลาย (ppm)	แคดเมียม ทั้งหมด (ppm)	แคดเมียมบนผิวของ มอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ (ppm)	มอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ (ppm)	ค่าความแรงไอออน (มิลลิโมลาร์)
1	3.09	9.70	10.10	0.40	129	0.003
2	6.01	9.30	10.78	1.48	115	0.003
3	8.04	8.30	12.56	4.26	109	0.003

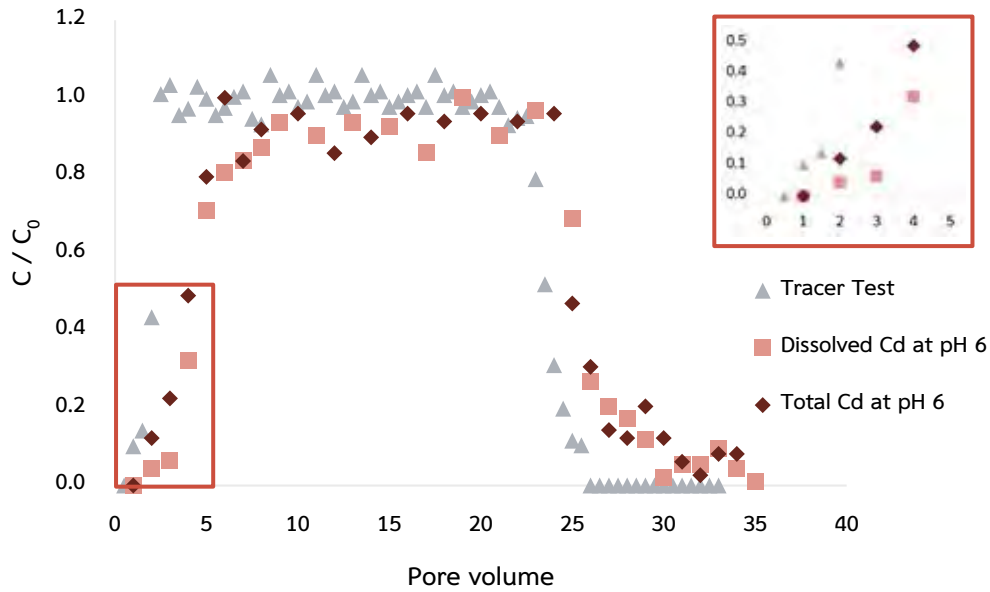


รูปที่ 4.2 กราฟ breakthrough แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ออกจากคอลัมน์ ต่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น (C / C_0) กับอัตราส่วนปริมาตรรูพรุน

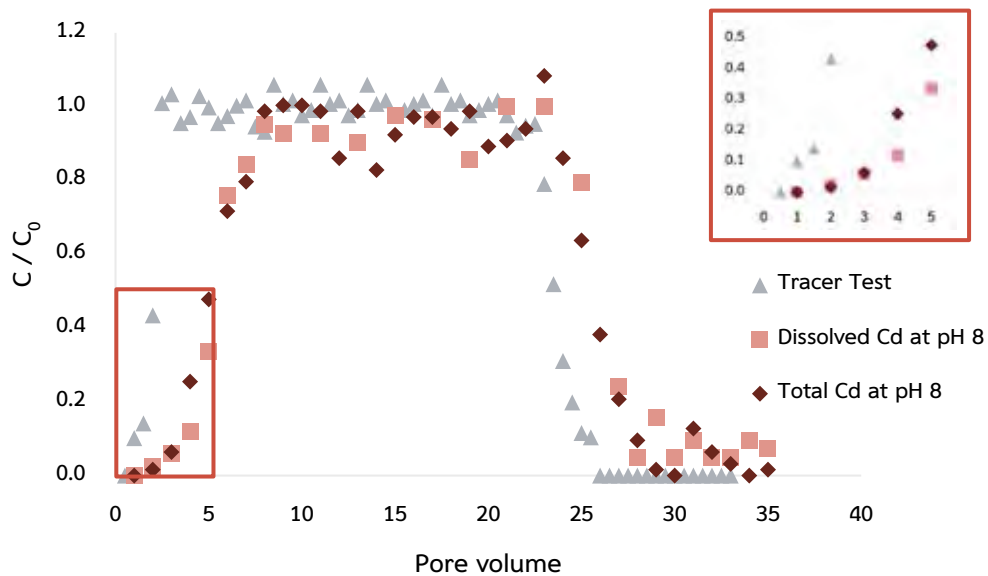
จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามปริมาตรสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ไปจนความเข้มข้นของแคดเมียมอยู่ในระดับคงที่ นอกจากนี้หากสังเกตกราฟ breakthrough ของค่าพีเอชเท่ากับ 8 (รูปที่ 4.5) ในช่วงแรกจะพบว่ามีแคดเมียมออกมาจากคอลัมน์ค่อนข้างเร็วกว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 (รูปที่ 4.3) เล็กน้อยเมื่อนำมาเทียบกัน



รูปที่ 4.3 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของแคดเมียมกับ ปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอช 3



รูปที่ 4.4 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของแคดเมียมกับ ปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.5 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C / C_0) ของแคดเมียมกับ ปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอช 8

เมื่อคำนวณพื้นที่เหนือกราฟของกราฟ breakthrough โดยคำนวณจากระยะจุดเริ่มต้นถึงจุดที่ C / C_0 เท่ากับ 1 เพื่อหาค่า Retardation factor (R_F) ซึ่งค่า Retardation factor คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของสารปนเปื้อนต่อความเร็วของน้ำ หรือกล่าวได้ว่าความเร็วการเคลื่อนตัวของมลสารเคลื่อนตัวช้ากว่าน้ำที่เท่า จากค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของความเร็วในการไหลระหว่างแคดเมียมทั้งหมด (Total Cadmium) และ

แคดเมียมในสารละลาย(Dissolved Cadmium) ตามตารางที่ 4.4 จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าพีเอชของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคดเมียมเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของแคดเมียมทั้งหมดเร็วกว่าการเคลื่อนตัวของแคดเมียมในสารละลายทุกค่าพีเอช และมีความเร็วในการเคลื่อนตัวสูงเพิ่มขึ้นจาก 23.62% เป็น 37.83% เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากพีเอช 3 เป็นพีเอช 8 เนื่องจากค่าพีเอชที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าศักย์ซีต้าซึ่งเป็นประจุบนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นลบมากขึ้น นั่นจึงทำให้สามารถติดกับแคดเมียมซึ่งเป็นประจุบวกได้ดีขึ้น เมื่อแคดเมียมติดอยู่กับผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มาก จึงเป็นสาเหตุให้เมื่อไหลผ่านคอลัมน์แล้ว มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์จึงพาแคดเมียมออกมาจำนวนมากขึ้นด้วย (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.4 Retardation factors ของการเคลื่อนตัวของแคดเมียม

คอลัมน์ที่	พีเอช		Retardation factor (R_f) *	% ความต่างของ ความเร็วในการไหล
1	3.09	แคดเมียมทั้งหมด	2.83	23.62
		แคดเมียมในสารละลาย	3.81	
2	6.01	แคดเมียมทั้งหมด	3.07	30.33
		แคดเมียมในสารละลาย	4.41	
3	8.04	แคดเมียมทั้งหมด	3.43	37.83
		แคดเมียมในสารละลาย	5.51	

*คำนวณมาจากพื้นที่เหนือกราฟของกราฟ breakthrough โดยมีระยะจากจุดเริ่มต้นถึงจุดที่ C / C_0 เท่ากับ 1

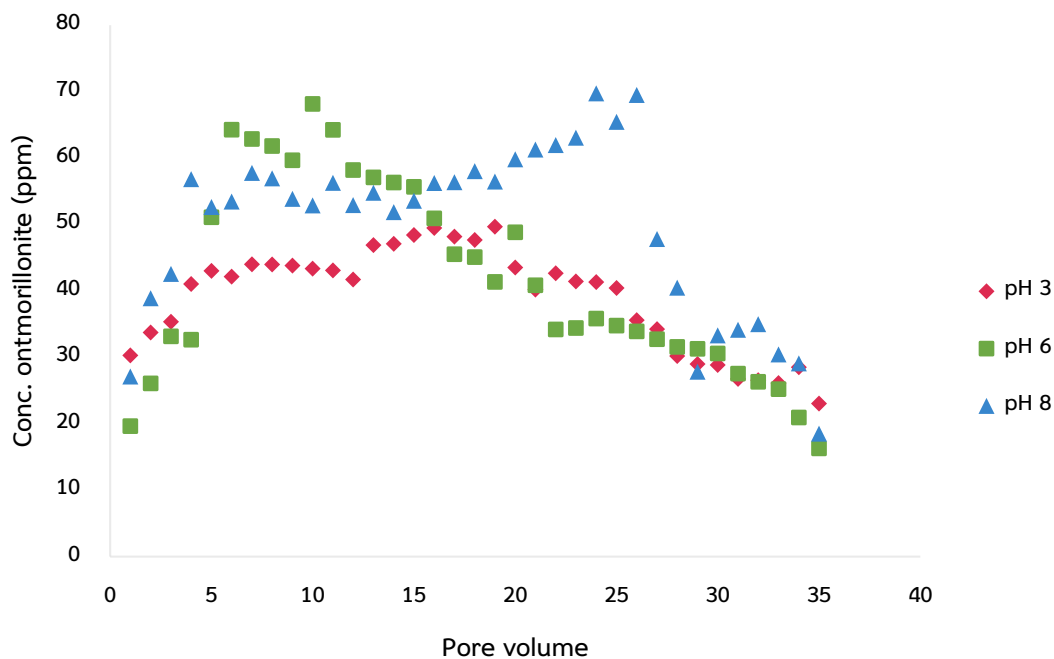
เมื่อนำความเข้มข้นของแคดเมียมมาคำนวณหาปริมาณแคดเมียมที่ออกมาในหน่วยมิลลิกรัม แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.5 และสามารถสรุปได้ว่าที่ค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแคดเมียมที่ออกมาจากคอลัมน์ก็มากขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณแคดเมียมเคลื่อนตัวออกมาสูงขึ้นจาก 53.17% เป็น 59.90% เมื่อพีเอชสูงขึ้นจาก 3.09 เป็น 8.04

ตารางที่ 4.5 ร้อยละของปริมาณแคดเมียมที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายอิมิตัวที่ค่าพีเอชต่างๆ

คอลัมน์ที่	พีเอช	แคดเมียมทั้งหมด* (ที่เข้าไป) (mg.)	แคดเมียมทั้งหมด* (ที่ออกมา) (mg.)	% แคดเมียมที่ออกมา
1	3.09	3.15	1.67	53.17
2	6.01	3.15	1.70	54.23
3	8.04	3.15	1.89	59.90

*คำนวณมาจากกราฟความเข้มข้นของแคดเมียม

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์กับปริมาตรรูพรุน (รูปที่ 4.6) และนำมาคำนวณหาปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ออกมาจะได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.6 และสามารถสรุปได้ว่าที่ค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่ออกมาก็สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ค่า pH 3 6 และ 8

ตารางที่ 4.6 ร้อยละของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

คอลัมน์ที่	พีเอช	Influent of montmorillonite (mg.)	Effluent of montmorillonite (mg.)	% Effluent of montmorillonite
1	3.09	31.50	10.59	33.62
2	6.01	31.50	11.22	35.62
3	8.04	31.50	13.40	42.55

*คำนวณมาจากกราฟความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

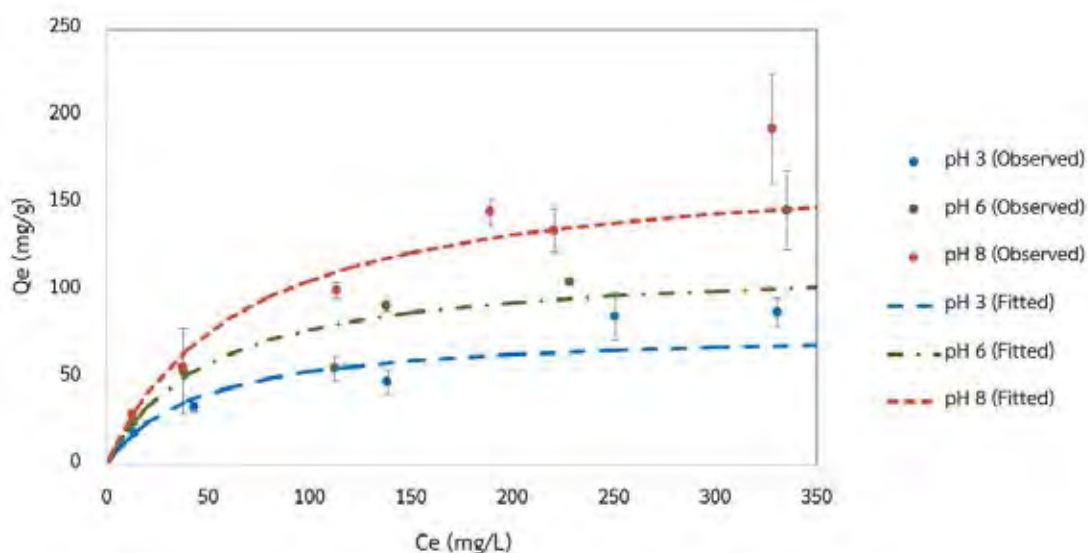
ซึ่งสาเหตุที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายมากขึ้น สามารถอธิบายได้จากขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ที่วัดได้จากเครื่อง Malvern Zetasizer Nano ว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์เล็กลง จาก 487 nm. เป็น 190.80 nm. และประจุลบบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์สูงขึ้นจาก -6.56 mV เป็น -13.10 mV เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นจากพีเอช 3 เป็นพีเอช 8 จึงเป็นสาเหตุให้เคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ทรายออกมาได้มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่า zeta potential และขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

คอลัมน์ที่	พีเอช	zeta potential (มิลลิโวลต์)	ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (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

4.4 ผลการดูดซับแคดเมียมบนมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

จากการศึกษาของ Chotpantararat และ Kiatvarangkul (2018) พบว่าที่ค่าพีเอช 8 มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมบนมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มากกว่าที่ค่าพีเอช 3 โดย Q_e คือ ค่าการดูดซับของแคดเมียมต่อมวลของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ และ C_e คือ ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย

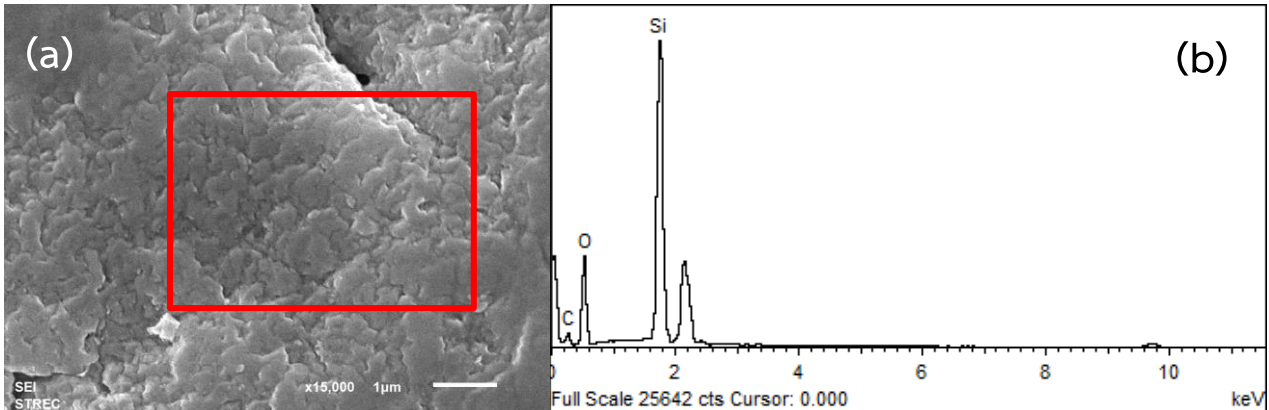


รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของ Langmuir แสดงความสามารถในการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์ K10 ที่ค่า pH 3 6 และ 8 (Chotpantararat and Kiatvarangkul, 2018)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลได้ว่าแม้ที่ค่าพีเอชสูง มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่สูงขึ้น แต่ก็มีปริมาณแคดเมียมไหลออกมาจากคอลัมน์มากขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากค่าพีเอชที่สูงขึ้นมีแคดเมียมบนผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มากขึ้น ทำให้เมื่อพีเอชที่สูงขึ้นจึงมีปริมาณแคดเมียมไหลออกมาเพิ่มขึ้นด้วย

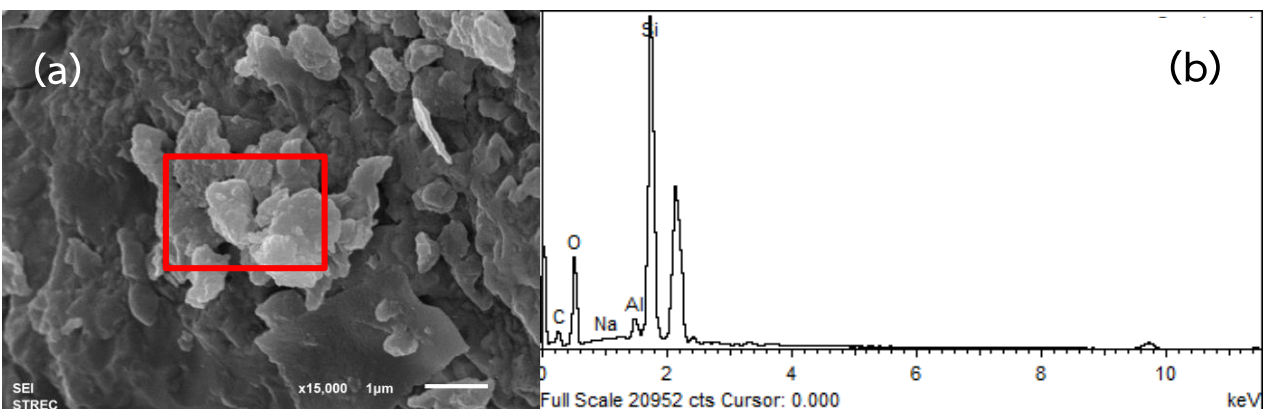
4.3 พื้นผิวของเม็ดทราย

SEM-EDX ใช้เพื่อดูพื้นผิวของเม็ดทรายและระบอบองค์ประกอบที่สำคัญ รูปที่ 4.8 (a) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของเม็ดทรายมีความขรุขระ ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ได้ นอกจากนี้ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของ EDX ของทรายยังแสดงถึงองค์ประกอบพื้นฐานของผลึกทรายซึ่งก็คือ Si และ O (รูปที่ 4.8 (b))

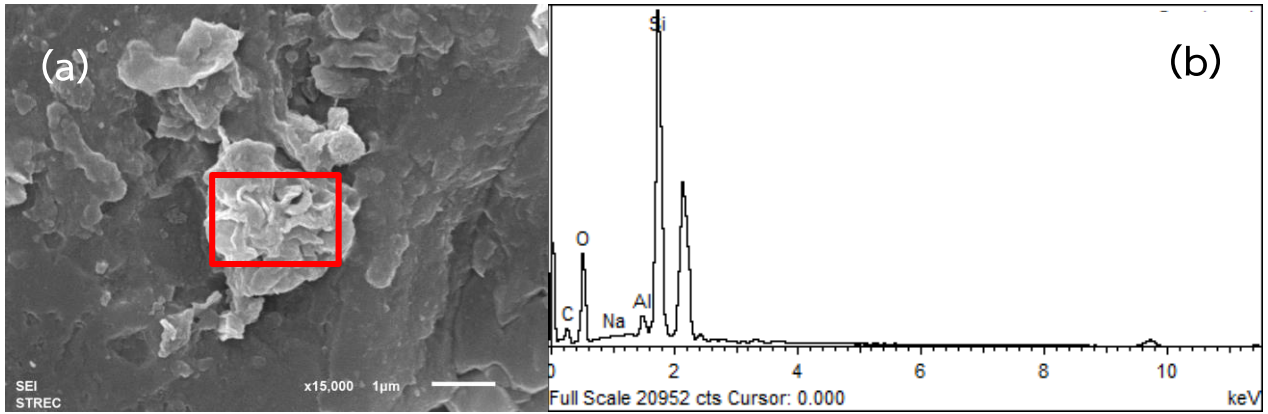


รูปที่ 4.8 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบนทราย

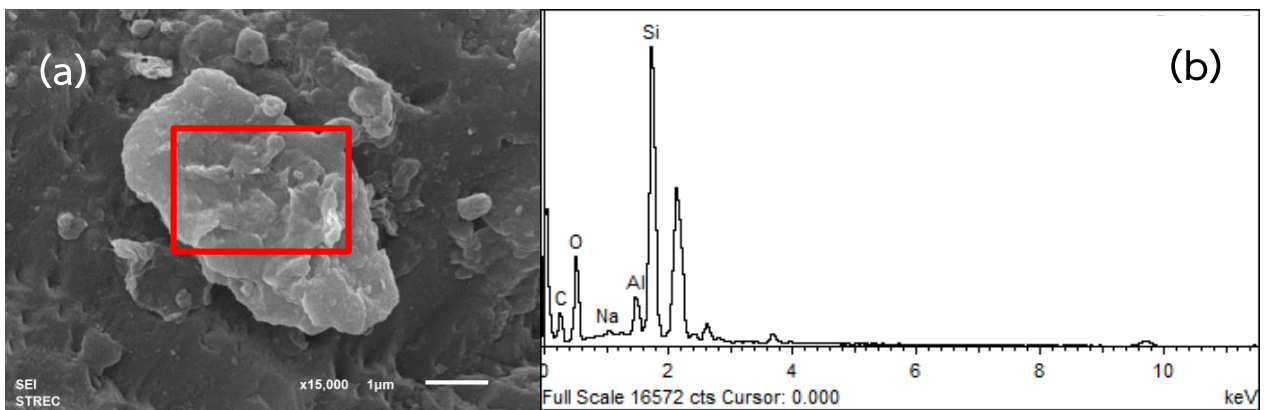
รูปที่ 4.9 แสดงภาพพื้นผิวของทรายจากคอลัมน์หลังเสร็จสิ้นการทำการทดลองที่สารละลายพีเอชเท่ากับ 3 นอกจากนี้รูปที่ 4.9 (a) แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์อยู่บนพื้นผิวของทราย ผลการวิเคราะห์ของ EDX (ในบริเวณกรอบสีแดง) เพื่อหาธาตุองค์ประกอบทางเคมีในรูปที่ 4.9 (b) ยืนยันว่ากลุ่มก้อนเหล่านี้เป็นมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ เนื่องจากมีองค์ประกอบของ Si Al Na และ O ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งพบทั้งในค่าพีเอช 6 และ 8 ด้วย (รูปที่ 4.10 และ 4.11)



รูปที่ 4.9 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบนทราย ที่ค่าพีเอช 3



รูปที่ 4.10 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบนทราย ที่ค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.11 (a) ภาพแสดงพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 15000 เท่า (b) สเปกตรัม EDX ที่ยิงบนทราย ที่ค่าพีเอช 8

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวของแคตไอออนโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะ (facilitator) ในคอลัมน์ทรายอิมมัลชันที่ค่าพีเอช 3 6 และ 8 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ :

1. เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์บนพื้นผิวทรายเป็นผลลดลง ได้จากปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงผลักไฟฟ้าระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และทราย รวมไปถึงที่ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ขนาดอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เล็กลงและเคลื่อนผ่านคอลัมน์ทรายออกมาได้มากขึ้นด้วย

2. เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณของแคตไอออนที่ออกมาหลังจากผ่านจากคอลัมน์มีปริมาณมากขึ้น สาเหตุเนื่องจากค่าพีเอชที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า zeta potential ซึ่งเป็นประจุบนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นลบมากขึ้น นั่นจึงทำให้สามารถดูดซับกับแคตไอออนซึ่งเป็นประจุบวกได้ดีขึ้น เมื่อแคตไอออนติดอยู่กับผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มาก จึงเป็นสาเหตุให้เมื่อไหลผ่านคอลัมน์แล้ว มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์จึงพาแคตไอออนออกมาจำนวนมากขึ้นด้วย

3. ค่าพีเอชของสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และแคตไอออนมีผลต่อการเคลื่อนตัวของแคตไอออนผ่านคอลัมน์ทรายอิมมัลชันให้เคลื่อนที่ออกมาเร็วขึ้น โดยดูได้จากค่า Retardation Factor ของแคตไอออน

พีเอช 3 : การเคลื่อนที่ของ Total Cd เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Cd 23.62%

พีเอช 6 : การเคลื่อนที่ของ Total Cd เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Cd 30.33%

พีเอช 8 : การเคลื่อนที่ของ Total Cd เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ Dissolved Cd 37.83%

จึงสรุปได้ว่ามอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีผลทำให้แคตไอออนเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วมากขึ้นที่ค่าพีเอช 8 มากกว่าที่ค่าพีเอช 6 และ 3 เรียงตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะผลของค่าพีเอชต่อการเคลื่อนตัวของแคตไอออนโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในสารละลาย แต่ในสภาพแวดล้อมจริงมีปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมายที่สามารถส่งผล

กระทบต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนักและการกระจายตัวของคอลลอยด์ เช่น ค่าความแรงไอออน อัตราการไหลของน้ำ ปริมาณของโลหะ ปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์ อุณหภูมิและจุลินทรีย์

2. ควรทำการทดลองเพื่อดูการเคลื่อนตัวของแคดเมียมที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์ในสารละลายเพื่อจะสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

3. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเท่านั้นอาจจะทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปควรศึกษาคอลลอยด์จริงจากสิ่งแวดล้อมและคอลลอยด์อื่น ๆ หรือรวมกับผลของโลหะหนักอื่นๆ ที่อาจพบรวมกันกับแคดเมียม อาทิ Zn Pb Hg และ As

เอกสารอ้างอิง

- ศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://science.skru.ac.th/ShowToolCame.php?id_skr=SKRU0987654321. [9 มีนาคม 2562]
- ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. UV-VIS Spectrophotometer. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=46. [9 มีนาคม 2562]
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Sarzanini, C., Mentasti, E., 2003. Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances. *Water Res.* 37, 1619 -1627.
- Aryal, R., Chong, M.N. and Gernjak, W. (2012). Influence of pH on Organic and Inorganic Colloids in Stormwater. *Journal of Water and Environment Technology* 10(3), 267-276.
- Batchelor, B., 1998. Leach models for contaminants immobilized by pH-dependent mechanisms. *Environ. Sci. Technol.* 32(11),1721-6.
- 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.
- Bunn, S.E., and A.H. Arthington. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30:492-507
- Chotpantararat, 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 (December): 216–31.
- Ciećko, Z., Kalembsa, S., Wyzkowski, M. and Rolka E. 2004. Effect of Soil Contamination by Cadmium on Potassium Uptake by Plants. *Polish Journal of Environmental Studies* 13(3), 333-337.
- DeNovio, N. M., J. E. Sayers, and J. N. Ryan. 2004. Colloid Movement in Unsaturated Porous Media: Recent Advances and Future Directions. *Vadose Zone Journal* 3 (2): 338–51.

- Echeverría R., Petra V., Inmaculada S., Luz María I.D., Željka F., Matej D., Piedad M.O., Nicolás O., and Juan P.A. 2002. Levels and Determinants of Adipose Tissue Cadmium Concentrations in an Adult Cohort from Southern Spain. *Science of The Total Environment* 670 (June), 1028–36.
- Forstner, U. and Whittmann, G. T. W. 1981. Metal pollution in the aquatic environment: New York, Springer-Verlag, 486.
- García, S. 2010. *Generation, stability and migration of montmorillonite colloids in aqueous systems*. School of Chemical Science and Engineering, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden
- Gazso, L.G. 2001. The Key Microbial Processes in the Removal of Toxic Metals and Radionuclides from the Environment. A review. *Cent. Eur. J. Occup. Environ. Med.* 7(3), 178–185.
- Grolimund, D., Elimelech, M., Borkovec, M., Barmetter, K., Kretzschmar, R. and Sticher, H. 1998. Transport of *in situ* mobilized colloidal particles in packed column. *Environmental Science and Technology* 32, 3562-3568.
- Ibaraki, M., and Sudicky, E. A. (1995) Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media 1. Numerical formulation and sensitivity analysis. *Water Resources Research* 31, 2495-2960.
- Idrees, N., Tabassum. B., Fathi, E., Allah, A., Hashem, A., Sarah, R., and Hashim, M., 2018. Groundwater contamination with cadmium concentrations in some West U.P. Regions, India. *Saudi Journal of Biological Sciences* 25, 1365–1368.
- Kadirvelu, K. and Namasivayam, C. 2003. Activated carbon from coconut coirpith as metal adsorbent: adsorption of Cd(II) from aqueous solution. *Advanced in environmental research* 7, 471-478.
- Kim, J. I. 1991. Actinide colloid generation in groundwater *Radiochem Acta* 52/53, 71-81.
- Kraepiel, A.M.L., Keller, K. and Morel, F.M.M. (1999). A Model for Metal Adsorption on Montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science* 210, 43–54.
- Kretzschmar, R.M., Borkovec, M., Grolimund, D. and Elimelech, M., 1999. Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport. *Adv. Agron.* 66, 121–193.
- Kwon, J., Yun, S., Lee, J., Kim, S., & Jo, H. (2010). Removal of divalent heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) and arsenic (III) from aqueous solutions using scoria: Kinetics and equilibrium of sorption. *Journal of Hazardous Material*, 174, 307-313.

- Lee, S., Ko, I.-W., Yoon, I.H., Kim, D.-W, and Kim, K.-W, 2018. Colloid Mobilization and Heavy Metal Transport in the Sampling of Soil Solution from Duckum Soil in South Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, March.
- 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.
- Nkedi-Kizza, P., Rao, P. S. C., Hornsby, A. G., 1987. Influence of organic cosolvent on leaching of hydrophobic organic chemicals through soils. *Environmental Science & Technology*, 21: 1107–1111.
- Patil, S. R. (2008). Impact of Water Chemistry (pH and Ionic Strength) on Colloid Transport Through Porous Medium. *Electronic Theses, Treatises and Dissertations*, 2135.
- Posadas, A.N.D., D. Gimenez, M. Bittelli, C.M.P. Vaz, and M. Flury. 2001. Multifractal Characterization of soil particle-size distribution. *Soil Science Society of America Journal* 65(5): 1361-1367.
- Roy, B. S. and Dzombak, A. D. Colloid release and transport processes in natural and model porous media. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 107 (February 1996): 245-262.
- Ryan, N. J., & Elimelech, M. (1996). Colloid mobilization and transport in groundwater. *Colloids and Surfaces*, 1-56.
- Sen, T. K., Mahajan, S. P. and Khilar, K. C. (2002). Colloid-associated contaminant transport in porous media: 1. *Experiment studies AIChE Journal* 48, 2366-2374.
- Srivastava, P. and Singh, B. Effect of ionic strength on cadmium adsorption onto kaolinite in single- and multi-element systems. 2010. 19th World Congress of Soil Science, Soil solutions for a changing world 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
- 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.
- Syers JK and Cisse L. 2000. Regional differences in the inputs of cadmium to soils. In SCOPE Workshop on Environmental Cadmium in the Food Chain: Sources, Pathways, and Risks. Belgian Academy of Sciences, Brussels, 13-16 September, 2000.
- Tang, X.Y., Weisbrod N. (2009). Colloid-facilitated transport of lead in natural discrete fractures. *Environmental Pollution* 157, 2266–2274.

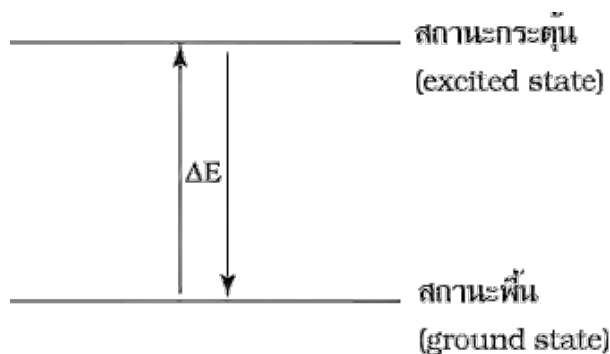
- USEPA. National primary drinking water standards; EPA 816-F-01-007; United States Environmental Protection Agency, Office of Water: Washington, DC, 2001; <http://www.epa.gov/safewater>.
- Walshe, G. E., Pang, L., Flury, M., Close, M. E. and Flintoft, M. 2010. Effects of pH, ionic strength, dissolved organic matter, and flow rate on the co-transport of MS2 bacteriophages with kaolinite in gravel aquifer media. *Water Research* 22, 1255-1269.
- WHO. Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, 1993.
- Wikiniyadhane, R., Chotpantarat, S., Ong, S.K., 2016. Transport and interaction of kaolinite and Cd²⁺ in a sand media: batch and column experiments. *Terr. Atmos. Ocean Sci.* 27 (2), 195-202.
- Xu, D., Tan, X.L., Chen, C.L., Wang, X.K., 2008. Removal of Pb(II) from aqueous solution by oxidized multiwalled carbon nanotubes. *J. Hazard. Mater* 154, 407-416.
- Yasutaka, T., Yukari I., Akihiko K., Masayuki S., Kazuo, H., Ute, K. and Hirofumi, S. 2017. Effects of Colloidal Particles on the Results and Reproducibility of Batch Leaching Tests for Heavy Metal-Contaminated Soil. *Soils and Foundations* 57 (5): 861-71.
- Yuan, Y., Peng, X., 2017. Fullerol-facilitated transport of copper ions in watersaturated porous media. *J. Hazard Mater.* 340, 96e103.
- Zhuang, J., Flury, M., and Jin, Y. 2003. Colloid-Facilitated Cs Transport through Water-Saturated Hanford Sediment and Ottawa Sand. *Environmental and Science Technology* 37 (21), 4905-4911
- 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.

ภาคผนวก

เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

หลักการทำงานของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (metal element) ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระ (free atom) ของธาตุดูดกลืน (absorb) แสงที่มีความยาวคลื่นระดับหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุ เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานได้แตกต่างกัน พลังงานที่พอดีกับคุณสมบัติเฉพาะของธาตุจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุนั้นๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (excited state) ดังรูปที่ ก.1 โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ต้องอยู่ในรูปของสารละลาย



รูปที่ ก.1 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) เป็นสถานะกระตุ้น (excited state)



รูปที่ ก.2 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

เครื่อง AAS มีองค์ประกอบสำคัญด้วยกันทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source)

แหล่งกำเนิดแสงของ AAS โดยทั่วไปเป็นหลอดแบบ hollow cathode lamp (HCL) และ electrodeless discharge lamp (EDL) ซึ่งในหลอด (lamp) จะบรรจุ buffer ของแก๊สเฉื่อย (inert gas) เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) หรือ นีออน (Ne) และมีการเคลือบเกลือของธาตุโลหะที่จะวิเคราะห์ไว้ที่ขั้ว cathode ของ lamp เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้ว cathode จะเกิดการ ionization ของ inert gas ไปชนกับเกลือของธาตุโลหะที่เคลือบไว้ ทำให้ธาตุโลหะหลุดออกจากขั้ว cathode แล้วไปชนกับ inert gas ทำให้ธาตุโลหะเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (excited state) แต่ไม่เสถียรจึงปล่อยพลังงานออกมาเป็นพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะกับธาตุแต่ละธาตุซึ่ง hollow cathode lamp มีทั้งแบบ single lame (ปล่อยพลังงานช่วงความยาวคลื่นสำหรับวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่ง) และแบบ multiple lamp (ที่ขั้ว cathode จะเคลือบเกลือของธาตุโลหะหลายชนิด มีการปล่อยพลังงานในหลายช่วงตามระดับพลังงานของธาตุที่เคลือบไว้ จะอาศัย monochromator ในการเลือกแสงที่ระดับความยาวคลื่นที่ต้องการใช้)

2. ส่วนที่ทำให้ธาตุดูดกลืนเป็นอะตอมอิสระ (atomizer หรือ atomization process)

การทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไป ซึ่งพลังงานดังกล่าวอาจอยู่ในรูปต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งส่วนประกอบของเครื่อง AAS ที่ให้พลังงานความร้อนเพื่อทำให้เกิดอะตอมอิสระนั้น เรียกว่า atomizer และกระบวนการที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระนั้นเรียกว่า Atomization process ได้แก่ Flam Atomization, Electrothermal atomization หรือ Graphite furnace หรือ flameless atomization , Hydride Generation Technique และ Cold Vapor Technique โดยมีรายละเอียดของแต่ละเทคนิคดังนี้

2.1) Flam Atomization ใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิด atomization process แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. Nebulization เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองฝอยเล็กๆ (mist หรือ aerosol) ด้วยส่วนของเครื่องที่เรียกว่า nebulizer โดยเครื่องจะดูดสารละลายเข้าไปเพื่อพ่นให้สารละลายไปชนกับ glass bead เพื่อให้เกิดเป็นละอองฝอย
2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กบางส่วน รวมกันเป็นหยดสารละลาย ไม่สามารถลอยอยู่ในอากาศได้จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (drain)
3. Mixing เป็นกระบวนการที่ mist หรือ aerosol ผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (fuel) และ ออกซิเจนแก๊ส (oxidant gas) เกิดใน spray chamber ของ nebulizer

4. Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ใน mist หรือ aerosol ถูกกำจัดออกไป ทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ (solid particles)
 5. Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟ โดยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นเป็นออกไซด์ เป็นโมเลกุลและเป็นอะตอมอิสระ
- 2.2) Electrothermal atomization หรือ Graphite furnace หรือ flameless atomization ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิด atomization process แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่
1. Drying stage เป็นการค่อยๆ ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป โดยปกติใช้อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 100°C)
 2. Ashing stage เป็นขั้นตอนที่ให้ความร้อนสูงขึ้น (อาจถึง 1,500 °C) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยโมเลกุลของสารเหล่านั้นจะแตกตัวออกไปเหลือแต่สารอนินทรีย์ที่เสถียรเท่านั้น โดยทั่วไปอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์
 3. Atomization stage เป็นขั้นตอนที่สารที่เหลืออยู่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูง (อาจถึง 3,000°C) เพื่อให้สลายเกิดเป็นอะตอมอิสระ
- 2.3) Hydride Generation Technique เนื่องจากธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค Flam Atomization และ Electrothermal atomization ไม่ได้ จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนเพื่อป้องกันการรวมกับออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านั้นกลายเป็นสารที่เป็นไอได้ง่ายๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการ reduce ให้เป็น hydrided แล้วให้ผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจนจะทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระได้ เป็นเทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As, Bi, Se, Pb, Sb, Sn และ Te
- 2.4) Cold Vapor Technique จัดเป็นวิธี flameless atomization แบบ Vapor Generation ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่เปลี่ยนเป็นไอได้ง่าย ได้แก่ การวิเคราะห์ปรอท โดยใช้การ reduction ของสารประกอบปรอท
3. Monochromator
 - ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการ (wavelength selector)
 4. Detector ของ AAS เป็นชนิด Photo Multiplier Tube (PMT)
 5. เครื่องประมวลผลและอ่านผล
- หมายเหตุ** เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ที่ใช้ในทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยครั้งนี้ตั้งอยู่ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผลิตภัณฑ์บริษัท PerkinElmer precisely รุ่น AAnalyst 200

เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงUltra violet (UV) และVisible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ใน ตัวอย่างเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง(absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ ก.3 ลักษณะของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1. แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้

ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

2. Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์(กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติ้ง (grating)

3. เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

ลักษณะของผลที่ได้: ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum

การประยุกต์ใช้งาน: ส่วนใหญ่จะใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย

หมายเหตุ เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ใช้ในทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยครั้งนี้ตั้งอยู่ที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผลิตภัณฑ์บริษัท Thermo Fisher Scientific รุ่น GENESYS™ 10S UV-Vis Spectrophotometer

ผลการทดลองจากคอลัมน์

ผลต่อการเคลื่อนตัวของแคดเมียมโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 8

ตารางที่ ก.1 ค่าความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นของแคดเมียมของคอลัมน์
pH = 3

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Cd (ppm)	Conc. Dissolved Cd (ppm)	Total Cd / C ₀ *	Dissolved Cd / C ₀ **	Conc. Montmorillonite colloid (ppm)
2	1	0.44	0.0	0.044	0.000	30.3024
4	2	0.44	0.2	0.044	0.021	33.7673
6	3	3.08	1.7	0.305	0.175	35.3649
8	4	4.18	2.4	0.414	0.247	41.0454
10	5	8.58	5.5	0.850	0.567	43.0243
12	6	10.78	8.4	1.067	0.866	42.1696
14	7	9.46	8.9	0.937	0.918	44.0302
16	8	9.24	9.7	0.915	1.000	43.9974
18	9	9.46	9.3	0.937	0.959	43.8396
20	10	10.12	9.2	1.002	0.948	43.3596
22	11	10.34	8.7	1.024	0.897	43.1164
24	12	11.00	9.6	1.089	0.990	41.7357
26	13	10.34	9.1	1.024	0.938	46.9165
28	14	10.56	9.0	1.046	0.928	47.0940
30	15	10.12	9.2	1.002	0.948	48.4352
32	16	10.78	9.7	1.067	1.000	49.4872
34	17	10.34	9.4	1.024	0.969	48.1854
36	18	10.12	9.2	1.002	0.948	47.6792
38	19	10.56	9.2	1.046	0.948	49.6778
40	20	9.68	8.6	0.958	0.887	43.5437
42	21	10.56	8.4	1.046	0.866	40.2235
44	22	9.68	8.7	0.958	0.897	42.6693
46	23	9.68	9.0	0.958	0.928	41.4464

48	24	9.46	9.3	0.937	0.959	41.3544
50	25	6.60	6.3	0.653	0.649	40.4668
52	26	2.42	1.7	0.240	0.175	35.6082
54	27	2.42	1.1	0.240	0.113	34.2538
56	28	0.22	0.1	0.022	0.010	30.2038
58	29	0.88	0.1	0.087	0.010	29.0007
60	30	0.22	0.5	0.022	0.052	28.8757
62	31	0.22	0.1	0.022	0.010	26.7653
64	32	0.22	0.4	0.022	0.041	26.5746
66	33	0.22	0.2	0.022	0.021	26.1341
68	34	0.22	0.1	0.022	0.010	28.5339
70	35	0.88	0.0	0.087	0.000	23.0506

หมายเหตุ : * C_0 ของ Total Cd เท่ากับ 10.10 ppm

** C_0 ของ Dissolved Cd เท่ากับ 9.7 ppm

ตารางที่ ก.2 ค่าความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นของแคตเมียมของคอลลิมัน์

pH = 6

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Cd (ppm)	Conc. Dissolved Cd (ppm)	Total Cd / C_0^*	Dissolved Cd / C_0^{**}	Conc. Montmorillonite colloid (ppm)
2	1	0.00	0.0	0.000	0.000	19.6581
4	2	1.32	0.4	0.122	0.043	26.1012
6	3	2.42	0.6	0.224	0.065	33.1887
8	4	5.28	3.0	0.490	0.323	32.6824
10	5	8.58	6.6	0.796	0.710	51.1111
12	6	10.78	7.5	1.000	0.806	64.2801
14	7	9.02	7.8	0.837	0.839	62.8863
16	8	9.90	8.1	0.918	0.871	61.8277
18	9	-	8.7	-	0.935	59.6910
20	10	10.34	-	0.959	-	68.1591
22	11	-	8.4	-	0.903	64.2669
24	12	9.24	-	0.857	-	58.2249

26	13	-	8.7	-	0.935	57.1137
28	14	9.68	-	0.898	-	56.3445
30	15	-	8.6	-	0.925	55.6870
32	16	10.34	-	0.959	-	50.9270
34	17	-	8.0	-	0.860	45.5490
36	18	10.12	-	0.939	-	45.1019
38	19	-	9.3	-	1.000	41.3609
40	20	10.34	-	0.959	-	48.8363
42	21	-	8.4	-	0.903	40.8580
44	22	10.12	-	0.939	-	34.2209
46	23	-	9.0	-	0.968	34.4208
48	24	10.34	-	0.959	-	35.8600
50	25	5.06	6.4	0.469	0.688	34.7903
52	26	3.30	2.5	0.306	0.269	33.9185
54	27	1.54	1.9	0.143	0.204	32.7482
56	28	1.32	1.6	0.122	0.172	31.5779
58	29	2.20	1.1	0.204	0.118	31.3018
60	30	1.32	0.2	0.122	0.022	30.6049
62	31	0.66	0.5	0.061	0.054	27.5759
64	32	0.29	0.5	0.027	0.054	26.3281
66	33	0.88	0.9	0.082	0.097	25.2176
68	34	0.88	0.4	0.082	0.043	20.9665
70	35	2.20	0.1	0.204	0.011	16.3051

หมายเหตุ : - คือตัวอย่างที่ไม่ได้มีการตรวจวัด

* C_0 ของ Total Cd เท่ากับ 10.78 ppm

** C_0 ของ Dissolved Cd เท่ากับ 9.3 ppm

ตารางที่ ก.3 ค่าความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นของแคตเมียมของคอลัมน์

pH = 8

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total Cd (ppm)	Conc. Dissolved Cd (ppm)	Total Cd / C ₀ *	Dissolved Cd / C ₀ **	Conc. Montmorillonite colloid (ppm)
2	1	0.00	0.0	0.000	0.000	27.1269
4	2	0.20	0.2	0.016	0.024	38.9218
6	3	0.80	0.5	0.064	0.060	42.5707
8	4	3.20	1.0	0.255	0.120	56.8376
10	5	6.00	2.8	0.478	0.337	52.6430
12	6	9.00	6.3	0.717	0.759	53.4648
14	7	10.00	7.0	0.796	0.843	57.7844
16	8	12.40	7.9	0.987	0.952	56.9691
18	9	12.60	7.7	1.003	0.928	53.8790
20	10	12.60	-	1.003	-	52.8994
22	11	12.40	7.7	0.987	0.928	56.2788
24	12	10.80	-	0.860	-	52.9323
26	13	12.40	7.5	0.987	0.904	54.7863
28	14	10.40	-	0.828	-	51.8738
30	15	11.60	8.1	0.924	0.976	53.5963
32	16	12.20	-	0.971	-	56.2722
34	17	12.20	8.0	0.971	0.964	56.3708
36	18	11.80	-	0.939	-	58.0408
38	19	12.40	7.1	0.987	0.855	56.4892
40	20	11.20	-	0.892	-	59.8356
42	21	11.40	8.3	0.908	1.000	61.3083
44	22	11.80	-	0.939	-	61.9658
46	23	13.60	8.3	1.083	1.000	63.0901
48	24	10.80	-	0.860	-	69.7633
50	25	8.00	6.6	0.637	0.795	65.4569
52	26	4.80	-	0.382	-	69.5069
54	27	2.60	2.0	0.207	0.241	47.8369

56	28	1.20	0.4	0.096	0.048	40.4997
58	29	0.20	1.3	0.016	0.157	27.8435
60	30	0.00	0.4	0.000	0.048	33.3202
62	31	1.60	0.8	0.127	0.096	34.1617
64	32	0.80	0.4	0.064	0.048	35.0099
66	33	0.40	0.4	0.032	0.048	30.4668
68	34	0.00	0.8	0.000	0.096	29.1059
70	35	0.20	0.6	0.016	0.072	18.5207

หมายเหตุ : - คือตัวอย่างที่ไม่ได้มีการตรวจวัด

* C_0 ของ Total Cd เท่ากับ 12.56 ppm

** C_0 ของ Dissolved Cd เท่ากับ 8.3 ppm

