



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ตในคอลัมน์ทรายอิมมั่ว

โดย

นางสาวสุกัญญา กิ่งเนียม
เลขประจำตัวนิสิต 5932739723

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562

ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทรายอิมมั่ว

นางสาวสุกัญญา กลิ่งเนียม

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562

IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT OF ARSENATE
IN SATURATED SAND COLUMN

MISS SUKANNEE KLANGNIAM

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF THE BACHELOR OF SCIENCE PROGRAM IN GEOLOGY
DEPARTMENT OF GEOLOGY, FACULTY OF SCIENCE, CHULALONGKORNUNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2019

หัวข้อโครงการ ผลกระทบของมอนต์มอรีโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตใน
 คอลัมน์ทรายอิ่มตัว
โดย นางสาวสุกัญญา กลิ่งเนียม
สาขาวิชา ธรณีวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

วันที่ส่ง/...../.....

วันอนุมัติ/...../.....

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

Project Title IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT OF
 ARSENATE IN SATURATED SAND COLUMN

By Miss Sukannee Klangniam

Field of study Geology

Advisor Assoc. Prof. Srilert Chotpantarat

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

Aproval date/...../.....

..... Project Advisor
(Assoc. Prof. Srilert Chotpantarat)

สุกัญณี กลั่นเนียม : ผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตใน
คอลัมน์ทรายอิ่มตัว (IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT OF
ARSENATE IN SATURATED SAND COLUMN)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์, 42 หน้า

การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาผลกระทบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนต โดยทดลองในคอลัมน์ที่บรรจุทรายซึ่งจำลองภายใต้การไหลของชั้นน้ำบาดาลมีแรงดัน ทำการทดลอง 3 คอลัมน์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันคือ 4 7 และ 10 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์ซิเนตและมอนต์มอริลโลไนต์ ประมาณ 10 และ 100 mg/l ตามลำดับ ไหลผ่านคอลัมน์ทรายอิ่มตัวจากด้านล่างสู่ด้านบนด้วยความเร็วคงที่ เท่ากับ 0.159 เซนติเมตรต่อนาที จากการทดลองพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10 อาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดย มอนต์มอริลโลไนต์และเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์คิดเป็นร้อยละ 13.16, 16.32 และ 2.99 ของมวลอาร์ซิเนต ที่เคลื่อนที่เข้าไปในคอลัมน์ โดยมีค่าปัจจัยความหน่วง (Retardation factor) เพิ่มขึ้นจาก 2.29 เป็น 4.57 เมื่อ พีเอชลดลงจากพีเอช 10 เป็นพีเอช 4 ขนาดของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ลดลงจาก 1150.50 nm เป็น 306.06 nm เมื่อเพิ่มจากพีเอช 4 เป็นพีเอช 10 เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ค้างอยู่ภายในคอลัมน์ ส่งผลให้อาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์มอริลโลไนต์เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ช้าในสภาวะที่เป็นกรด เมื่อ เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตโดยมีและไม่มีผลของมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่าอาร์ซิเนตเคลื่อนที่ ภายในคอลัมน์ทรายอิ่มตัวได้เร็วขึ้นเมื่อมีมอนต์มอริลโลไนต์ โดยอาร์ซิเนตในคอลัมน์ที่มีมอนต์มอริลโลไนต์มี ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงขึ้นร้อยละ 55.06 และ 61.19 ที่พีเอช 4 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมการดูดซับ อาร์ซิเนตภายในคอลัมน์ทรายอิ่มตัวอธิบายได้ด้วยผลจากโปรแกรม Hydrus-1D โดยพบว่าที่พีเอช 10 มี พฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับ two-site model (TSM) โดยมีค่า R-Squared เท่ากับ 0.9917 ในขณะที่พี เอช 4 และ 7 สอดคล้องกับ Equilibrium model (CDeq) โดยมีค่า R-Squared เท่ากับ 0.9569 และ 0.9759 ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการศึกษาพฤติกรรมดูดซับของอาร์ซิเนตภายในคอลัมน์ทรายอิ่มตัวโดยไม่มีผล ของมอนต์มอริลโลไนต์ ดังนั้นการมีมอนต์มอริลโลไนต์จึงไม่ได้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดูดซับของอาร์ซิเนตที่พีเอช เท่ากับ 4 และ 7 และจากข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จาก HYDRUS-1D พบว่าค่าคงที่ของฟรุนดริช (Freundlich constants, K_f) ของแบบจำลอง Equilibrium model ลดลงจาก 4.363 เป็น 4.094 และ 3.714 เช่นเดียวกับ Nonequilibrium model ก็ลดลงจาก 4.763 เป็น 4.672 และ 3.778 สำหรับพีเอช 4 7 และ 10 ตามลำดับ

ภาควิชา ธรณีวิทยา ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา ธรณีวิทยา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2562

5932739723: MAJOR GEOLOGY

**KEYWORD : MONTMORILLONITE COLLOID / ARSENATE / GROUNDWATER / ARSENATE
TRANSPORT / HEAVY METAL TRANSPORT / PH**

**SUKANNEE KLANGNIAM: IMPACT OF MONTMORILLONITE COLLOID ON TRANSPORT
OF ARSENATE IN SATURATED SAND COLUMN**

ADVISORS : ASSOC. PROF. DR. SRILERT CHOTPANTARAT , 42 pp.

This research investigated the impact of montmorillonite colloid on the transport of arsenate (As(V)) through a saturated sand column. The As(V) bearing montmorillonite colloid solution at pH 4, 7, and 10 flow from the bottom to top of the column with stable flow rate at 0.159 cm/min. The initial concentrations of As(V) and montmorillonite were approximately 10 and 100 mg/l, respectively. Based on the column experiments, As(V) was adsorbed by montmorillonite, and transport through the column was approximately 13.16%, 16.32%, and 2.99% of The total mass As(V) that inject the column, for pH 4, 7, and 10, respectively. Furthermore, the retardation factor (RF) of As(V) generally increased from 4.57 to 2.29 with decreasing pH from pH 10 to pH 4. The particle size of montmorillonite colloids depends on solution pH and appeared to decline from 1150.50 nm to 306.06 nm with increasing pH from pH 4 to pH 10. This causes montmorillonite colloid retain inside sand particle, leading As(V) adsorbed by montmorillonite move through the saturated sand column slower at the lower pH condition. As comparing the transport of As(V) with and without montmorillonite colloids, it showed that As(V) in the column with montmorillonite colloid could move faster higher than the other one approximately 55.06% and 61.19% for pH 4 and 7 respectively. Finally, the mechanism of As(V) sorption at pH 10 columns corresponded to the two-site model (TSM) with R-Squared of 0.9917, whereas at pH 4 and pH 7 corresponded to the uniform (equilibrium) solute transport (CDeq) model with R-Squared 0.9569 0.9759, respectively. Interestingly, the mechanism of As(V) sorption can be explained by uniform (equilibrium) solute transport model (CDeq) at pH 4 and pH 7, regardless of the appearance of montmorillonite colloid in sand columns. The parameters from Hydrus-1D showed that Freundlich constant (K_F) from both of CDeq and TSM tends to decrease for pH 4,7 and 10, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยชิ้นนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำตลอดกระบวนการทำงาน ตั้งแต่การเตรียมสาร การทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมถึงการนำเสนอและการจัดทำรูปเล่มของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำแนะนำตลอดการทำงาน ขอขอบพระคุณคุณจิระประภา เนียมปาน และคุณบรรจง พวงทอง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการธรณีเคมี ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการใช้ห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคลากรภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยประสานงานจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และนางสาวฉันทนา อินทิม ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองในวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณนางสาวสาธิตา บุญแก้ววรรณ, นายพงศธร ธีญญวัชรกุล และนางสาวกัญชลิษา แก้วสระแสน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการวิเคราะห์ปริมาณอาร์ซิเนตที่เคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายอิมมัวร์ และการวิเคราะห์ขนาดและ Zeta potential ของอนุภาคมอนต์มอริลไลโนต์คอลลอยด์

ขอขอบพระคุณหอพักนิสิตจุฬา และโครงการ CU V Care ที่ติดต่อประสานงาน เอื้อเฟื้อสถานที่และอาหาร ในช่วงกักตัวเป็นระยะเวลา 14 วัน ก่อนการเข้าใช้ห้องปฏิบัติการ ในขณะที่มีระบาดของ COVID-19

ขอขอบคุณนางสาวอรกช เชาวโพธิ์ทอง ที่ร่วมกันระดมความคิดและลงมือทำตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทำงาน นางสาวมณิสรา สุขปลั่ง, นางสาวมัญชฎา ก่อเกียรติเจริญ, นางสาวศรีอมรา มีพริ้ง, นางสาวเกศินี หอมจันทร์, นางสาวนงรัตน์ ศุภรสุด ที่ช่วยเตรียมสารเพื่อใช้ในการทดลอง นายรัชพล หนูทอง, นายถิรวัฒน์ ตีกโพธิ์ ที่ให้คำแนะนำในการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ XRF และนางสาวกุลญาดา สุขสมพงษ์ ที่ร่วมเดินทางไปวิเคราะห์ปริมาณอาร์ซิเนต ณ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจตลอดการทำงาน หายที่สุดนี้ขอขอบคุณ GOT7 ที่สร้างรอยยิ้มทุกสถานการณ์ความเครียดของการทำงาน

นางสาวสุกัญญา กลิ่งเนียม
(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	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 สารหนู (Arsenic, As)	3
2.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	4
2.1.3 การดูดซับและการพอลิเมอไรเซชันของมอนต์มอริลโลไนต์	6
2.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์	7
2.1.5 การดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์	8
2.2 ทฤษฎี	9
2.2.1 Retardation factor	9
2.2.2 Hydrus-1D Program	10
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	12
3.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	12
1. ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	12
2. ออกแบบการทดลองและเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง	12
3. ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	15

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	18
4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ก่อนการทดลอง	18
4.2 การเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตโดยมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ในคอลัมน์ทรายอิมิต์วที่ค่าพีเอชต่างๆ	18
4.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตผ่านคอลัมน์ทรายอิมิต์ว โดยโปรแกรม Hydus-1D	26
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของเม็ดทราย	29
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	31
5.1 สรุปผลการศึกษา	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	35

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์	18
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของคอลลิ้นท์รายอิมิตัวที่ใช้ในการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10	18
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนตที่ค่าพีเอชต่างๆ	19
ตารางที่ 4.4 ปริมาณอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์มอริลโลไนต์และเคลื่อนที่ออกจากคอลลิ้นท์	22
ตารางที่ 4.5 Retardation factor ของอาร์ซิเนตทั้งหมดที่พีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10	23
ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์	23
ตารางที่ 4.7 Zeta potential ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์	23
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอลลิ้นท์รายอิมิตัวที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10	24
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบ Retardation factor ของอาร์ซิเนตเมื่อมีและไม่มีผลของมอนต์มอริลโลไนต์ในสารละลายที่พีเอช 4 และ 7	26
ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้งที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Hydus-1D	29

สารบัญรูปลูกภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบของอาร์ซีเนตที่เสถียรภายใต้สภาวะค่าพีเอชที่แตกต่างกัน	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์	5
รูปที่ 2.3 ประจุไฟฟ้าที่ผิวของแร่ดิน	5
รูปที่ 2.4 ค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) ของพื้นผิวของแข็งที่ล้อมรอบด้วยไอออนในสารละลาย	8
รูปที่ 3.1 ทราายที่ผ่านการล้างด้วย NaOH และ HNO ₃ ในเครื่องอัลตราโซนิก	13
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกรองเพื่อกำจัดโลหะออกไซด์และอนุภาคอื่นๆบนผิวทราาย	13
รูปที่ 3.3 สารละลายมอนต์มอริลโลไนต์	14
รูปที่ 3.4 การแยกชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 M	14
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงชุดการทดลอง	15
รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองคอลัมน์ทราายอิมตัว	15
รูปที่ 3.7 Flowchart ขั้นตอนการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการทดลอง	17
รูปที่ 4.1 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C ₀) กับปริมาตรรูปลูกภาพที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4	19
รูปที่ 4.2 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C ₀) กับปริมาตรรูปลูกภาพที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7	20
รูปที่ 4.3 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C ₀) กับปริมาตรรูปลูกภาพที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10	20
รูปที่ 4.4 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C ₀) กับปริมาตรรูปลูกภาพของอาร์ซีเนตทั้งหมดที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10	21
รูปที่ 4.5 กราฟ breakthrough เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอาร์ซีเนตในคอลัมน์ทราายอิมตัว กับอาร์ซีเนตที่มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4	24
รูปที่ 4.6 กราฟ breakthrough เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอาร์ซีเนตในคอลัมน์ทราายอิมตัว กับอาร์ซีเนตที่มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7	25
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve fitting) ของ Equilibrium model (Eq) และ The two-site model (TSM) ของอาร์ซีเนตทั้งหมด	26
รูปที่ 4.8 (ก) มอนต์มอริลโลไนต์บนพื้นผิวของทราาย (ข) สเปกตรัม EDX บนผิวทราาย ที่ค่าพีเอช 4	29
รูปที่ 4.8 (ก) มอนต์มอริลโลไนต์บนพื้นผิวของทราาย (ข) สเปกตรัม EDX บนผิวทราาย ที่ค่าพีเอช 7	29
รูปที่ 4.10 (ก) มอนต์มอริลโลไนต์บนพื้นผิวของทราาย (ข) สเปกตรัม EDX บนผิวทราาย ที่ค่าพีเอช 10	30

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สารหนู (Arsenic, As) เป็นธาตุกึ่งโลหะชนิดหนึ่งที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งในรูปแบบของสารอินทรีย์ที่อยู่กระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต และสารอนินทรีย์ (Duker et al., 2005) โดยสารหนูที่มีสถานะออกซิเดชัน +3 และ +5 (Arsenite, As^{3+} , Arsenate, As^{5+}) พบมากที่สุดในแหล่งน้ำ (Greenwood and Earnshaw, 1984) การปนเปื้อนของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติเกิดจากลักษณะทางธรณีวิทยาและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ เป็นผลให้เกิดสารหนูจากการออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ (Smedley and Kinniburgh, 2002) แต่เนื่องจากสารหนูมีความเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูที่ยอมรับได้ในน้ำดื่มต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.01 mg/L (USEPA, 2001) แต่จากรายงานสถานการณ์น้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2560 พบว่าในหลายพื้นที่ของประเทศไทยยังคงมีปริมาณสารหนูเกินค่ามาตรฐาน เช่น บริเวณแอ่งน้ำบาดาลระยอง ตรวจพบบ่อบาดาลที่มีสารหนูเกินมาตรฐานในชั้นน้ำบาดาลที่เป็นหินร่วนร้อยละ 20.61 จากบ่อที่ทำกรวดในฤดูฝน มีปริมาณสารหนูอยู่ระหว่าง 10.90-497.5 $\mu\text{g/L}$ และชั้นน้ำบาดาลที่เป็นหินแข็งพบสารหนูเกินมาตรฐานร้อยละ 38.18 จากบ่อที่ทำกรวดในฤดูฝน มีค่าอยู่ระหว่าง 10.3-258.8 $\mu\text{g/L}$ และมีแนวโน้มปริมาณสารหนูเกินมาตรฐานสูงขึ้นในฤดูแล้ง

แร่ดิน (Clay mineral) ถูกนำมาใช้ในการดูดซับสารหนูอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพบเป็นปริมาณมากในสิ่งแวดล้อม และมีคุณสมบัติที่เหมาะสม กล่าวคือ มีพื้นที่ผิวมาก และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกและไอออนลบ (Hu and Luo, 2010) จากการศึกษาของ Frost and Griffin (1997) พบว่าสารหนู (As^{3+} , As^{5+}) จากน้ำที่ชะขยะมูลฝอย ถูกดูดซับโดยแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ได้ดีกว่าแร่เคโอลินไนต์ (kaolonite) เพราะมีพื้นที่ผิวมากกว่า และจากผลการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบของพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการดูดซับสารหนู (As^{3+} , As^{5+}) โดยใช้ X-ray photoelectron spectroscopy แสดงให้เห็นว่าอะตอมของออกซิเจนที่ผิวของมอนต์มอริลโลไนต์มีการสร้างพันธะกับสารหนู จึงสามารถดูดซับสารหนูไว้ได้ (Ren et al., 2014)

อนุภาคคอลลอยด์พบได้ทั่วไปในสภาพแวดล้อมใต้ผิวดิน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร (Kretzschmar et al., 1999) และในน้ำบาดาลมีความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์อยู่ในช่วง 10^8 ถึง 10^{17} อนุภาคต่อลิตร (Kim, 1991) การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์เป็นกระบวนการสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในสภาพแวดล้อมใต้ผิวดิน เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีพื้นที่ผิวและความเข้มข้นของประจุบริเวณพื้นผิวสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับที่ดี (Amrhein et al. 1993; De Jonge et al. 2004) จากการศึกษาของ Lee et al. (2018) พบว่าความเข้มข้นของสารหนู (As) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ในดินเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มมากขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการ

ทดลองในระบบปิดที่มีความสมดุลทางเคมี (Batch experiment) โดยไม่คำนึงถึงระบบการไหลของน้ำบาดาล ซึ่งอาจจะมีผลต่อการเคลื่อนที่และดูดซับโลหะหนักของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ต โดยจำลองในรูปแบบของการทดลองในคอลัมน์ทรายอิมมัว รวมผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับอาร์ซีเน็ตของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ตในคอลัมน์ทรายอิมมัว
2. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ตในมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ภายในคอลัมน์ทรายอิมมัว

1.3 สมมติฐาน

1. มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีผลต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ตในคอลัมน์ทรายอิมมัว
2. การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ตและมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ภายในคอลัมน์ทรายอิมมัว

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ต่อการดูดซับอาร์ซีเน็ตของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ (Montmorillonite K10) โดยทำการศึกษาในระบบคอลัมน์ทรายอิมมัว

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของอาร์ซีเน็ตกับมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมมัว

บทที่ 2

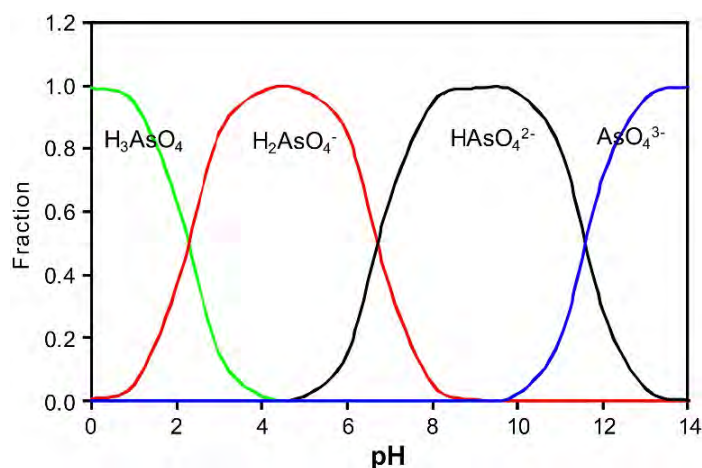
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สารหนู (Arsenic, As)

สารหนู (Arsenic, As) เป็นธาตุกึ่งโลหะ ที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 และมีมวลอะตอม 74.921 g/mol สารหนูเป็นองค์ประกอบตามธรรมชาติของเปลือกโลก โดยสามารถปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำทั้งในรูปแบบของสารอินทรีย์ที่อยู่กระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต และสารอนินทรีย์ (Duker et al., 2005) ผ่านกระบวนการทางธรณีวิทยาและกิจกรรมของมนุษย์ ตัวอย่างการเกิดสารหนูตามธรรมชาติ เช่น เกิดจากการผุพังของหินและตะกอน ความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น แหล่งกำเนิดสารหนูจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การทำเหมืองแร่ เป็นผลให้เกิดสารหนูจากการออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ (Smedley and Kinniburgh, 2002) การใช้สารกำจัดศัตรูพืช การชะล้างผ่านหลุมฝังกลบของเสีย การผลิตถ่านหินและปิโตรเลียม สารหนูมีพิษเฉียบพลันและกึ่งเฉียบพลันต่ออวัยวะหลายระบบ เช่น เกิดอาการอักเสบของกระเพาะอาหารและลำไส้อย่างรุนแรง ทำให้อาเจียน ถ่ายอุจจาระเป็นน้ำหรือเป็นเลือด เกิดความผิดปกติของหัวใจ มีไข้สูง ความดันต่ำ เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2554) ดังนั้นสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูที่ยอมรับได้ในน้ำดื่มต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.01 mg/L (USEPA, 2001)

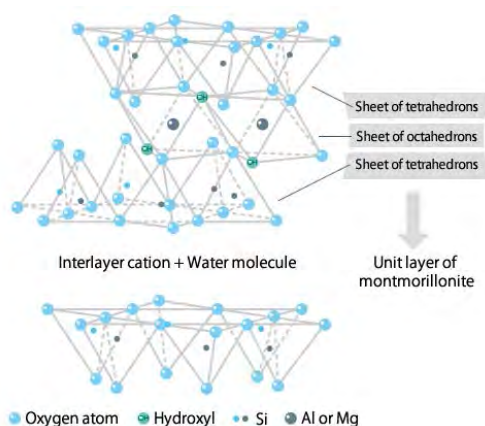
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reaction) ของสารหนูขึ้นอยู่กับศักยภาพการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox potential) และค่าพีเอช ซึ่งในแหล่งน้ำธรรมชาติสารหนูมีสถานะออกซิเดชัน +3 และ +5 นั่นคือ Trivalent arsenite (AsIII) และ pentavalent arsenate (AsV) ตามลำดับ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมักพบสารหนูในรูปแบบของอาร์ซิเนต (Arsenate) และการมีอยู่ของออกซิเจนนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง โดยที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6.9 พบ H_2AsO_4^- มาก ในขณะที่ค่าพีเอชสูงพบ HAsO_4^{2-} การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 9.2 พบสารหนูในรูปแบบอาร์ซิไนท์ (Arsenite) ที่เป็นกลาง นั่นคือ H_3AsO_3 สารหนูจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ดังนั้นค่าพีเอชจึงมีความสำคัญในการก่อตัวและการเกิดขึ้นของสารหนูรูปแบบต่างๆในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Flora, 2015) โดยความเสถียรของอาร์ซิเนตภายใต้สภาวะค่า pH ต่างกันแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบของอาร์ซิเนตที่เสถียรภายใต้สภาวะค่าพีเอชที่แตกต่างกัน
(ที่มา <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0000641>)

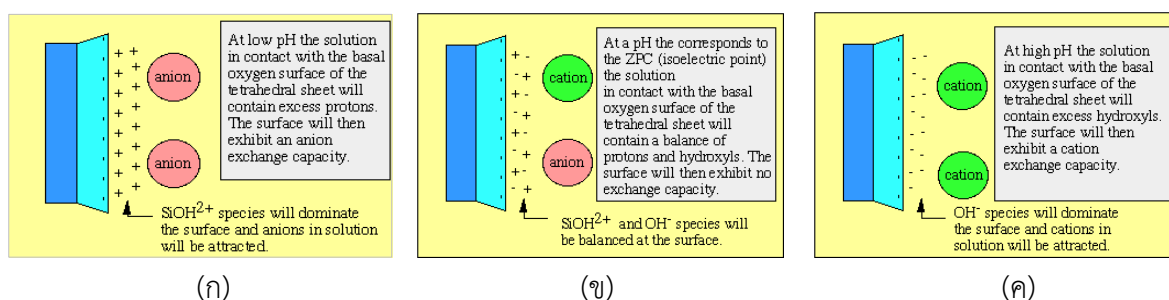
2.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดิน (Clay mineral) จัดอยู่ในกลุ่มสมเมกไทต์ (Smectite Group) มีสูตรโครงสร้าง คือ $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$ โครงสร้างทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นที่เรียงตัวเป็นชั้นๆ (Phyllosilicate) แต่ละชั้น (Unit layer) ประกอบด้วยแผ่นโครงสร้างสองประเภทคือ แผ่นที่เกิดจากซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) เรียงตัวเป็นปิรามิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedral sheet) และแผ่นที่มีการเรียงตัวเป็นทรงแปดหน้า (Octahedral sheet) จากอลูมิเนียม (Al) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่สร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจนในแผ่น Tetrahedral sheet โดย Octahedral sheet วางตัวอยู่ระหว่าง Tetrahedral sheet เรียก T-O-T layer หลายๆชั้น (Unit layer) เชื่อมต่อกันด้วยไอออนบวก เรียก Interlayer cation ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงทางไฟฟ้า หรือพันธะไฮโดรเจน ประจุที่เกิดขึ้นจากการเรียงตัวของธาตุใน Tetrahedral sheet และ Octahedral sheet ส่งผลต่อประจุโดยรวมของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งมักมีการแทนที่ของธาตุในผลึกของแร่ด้วยธาตุอื่นโดยไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี (Isomorphous) ตัวอย่างเช่น Al^{3+} สามารถแทนที่ Si^{4+} ใน Tetrahedral sheet และแทนที่ Al^{3+} ใน Octahedral sheet ด้วย Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} เป็นผลให้พื้นผิวของ Unit layer มีประจุไฟฟ้าไม่เพียงพอและเป็นประจุลบ เพื่อรักษาสสมดุลประจุไฟฟ้าจึงมีไอออนบวก เช่น แคลเซียม โซเดียม หรือแมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว มาเชื่อมต่อระหว่าง Unit layer เรียก Interlayer cation ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงทางไฟฟ้า หรือพันธะไฮโดรเจน (Uddin, 2018) โครงสร้างทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์
(ที่มา <https://www.kunimine.co.jp/english/bent/basic.html>)

ศักยภาพของประจุไฟฟ้าที่ผิวของแร่ดินในน้ำถูกกำหนดโดยค่าพีเอชและไอออนของสารละลายที่ทำให้ปฏิกิริยากับพื้นผิวแร่ การดูดซับโปรตอนและหมู่ไฮดรอกซิลรวมถึงประจุบวกและประจุลบอื่นๆ ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point zero charge, PZC หรือ Isoelectric Point, IEP) คือ ประจุทั้งหมดจากประจุบวกและประจุลบที่ผิวมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ค่าพีเอชค่าหนึ่ง (pH_{pzc}) แร่มอนต์มอริลโลไนต์มีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pzc) ที่ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.0 ถึง 6.0 (Liu et al., 2008) โดยที่ pH_{pzc} อะตอมของออกซิเจนที่ Tetrahedral sheet จะมีไอออนบวกและไอออนลบมาเชื่อมต่อเท่าๆกัน จึงไม่แสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (No exchange capacity) โดยที่ pH ต่ำกว่า pH_{pzc} อะตอมของออกซิเจนที่ Tetrahedral sheet จะมีไอออนบวกมาเชื่อมต่อ พื้นผิวของแร่ดินซึ่งเป็นประจุลบจะแสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange capacity) และที่ pH สูงกว่า pH_{pzc} อะตอมของออกซิเจนที่ Tetrahedral sheet จะมีไอออนลบมาเชื่อมต่อ จึงแสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ประจุไฟฟ้าที่ผิวของแร่ดิน; (ก) ที่ pH ของสารละลายต่ำกว่า pH_{pzc} , (ข) ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ pH_{pzc} , (ค) ที่ pH ของสารละลายสูงกว่า pH_{pzc}
(ที่มา <http://clay.uga.edu/courses/8550/CM19.html>)

มอนต์มอริลโลไนต์จึงเป็นตัวดูดซับที่ดี โดยสามารถดูดซับโลหะหนักผ่านสองกลไกที่แตกต่างกัน แบบแรกคือเกิดการดูดซับบนระนาบระหว่างชั้น (interlayer) ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์โดยเมื่อสัมผัสกับสารอื่น ๆ ที่มีไอออนบวกจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับไอออน (+) ที่อยู่ในระนาบระหว่างชั้น พร้อมกันนั้นก็ได้แลกเปลี่ยนกับไอออน (+) ของสารเคมีอื่น ๆ ทันทึ และในดูดซับแบบที่สองจะเกิดขึ้นที่ขอบของระนาบ ซึ่งจะผันแปรตามการก่อตัวที่ซับซ้อนผ่านกลุ่มซิลิกอนโมโนออกไซด์ (Si -O-) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al -O-) โดยกลไกทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสภาวะกรด (pH<4) (Batchelor, 1998)

2.1.3 การดูดซับและการพำอาวาร์ชีเนตของมอนต์มอริลโลไนต์

Mohapatra และคณะ (2007) ได้ศึกษาการดูดซับอาร์ชีเนตของแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และอิลไลต์ (Illite) จากบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทย ด้วยวิธี Batch experiment โดยศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์ชีเนต การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ระยะเวลาในการสัมผัสกันของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ และอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับ 40 g/L และความเข้มข้นของอาร์ชีเนตเริ่มต้น 10 mg/L ที่พีเอชระหว่าง 2 ถึง 5 การดูดซับค่อนข้างคงที่ โดยแร่เคโอลิไนต์ มอนต์มอริลโลไนต์ และอิลไลต์ มีค่าการดูดซับเท่ากับ 78% 54% และ 47% ตามลำดับ และลดลงเป็น 40% 24% 18% เมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 9 ดังนั้นแร่เคโอลิไนต์จึงสามารถดูดซับอาร์ชีเนตได้มากที่สุด รองลงมาเป็นมอนต์มอริลโลไนต์ และอิลไลต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Mathialagan และ Viraraghawan (2002) ที่พบว่าอะตอมของออกซิเจนที่ผิวของแร่ในกลุ่มแร่ดิน (Clay mineral) เกิดปฏิกิริยากับน้ำในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้เกิดประจุบวกที่พื้นผิว และสามารถดูดซับอาร์ชีเนตที่เป็นประจุลบได้นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์ชีเนตระหว่าง 1-10 mg/L โดยใช้ตัวดูดซับ 40 g/L ที่พีเอชเท่ากับ 5 ระยะเวลาในการสัมผัสกันของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับเท่ากับ 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับคงที่ ร้อยละของอาร์ชีเนตที่ถูกดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์ชีเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณที่เกิดการดูดซับ (Active adsorption site) ไม่เพียงพอต่อปริมาณอาร์ชีเนตเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาว่า R^2 พบว่า Langmuir isotherm สามารถอธิบายการดูดซับของอาร์ชีเนตได้ดีกว่า Freundlich isotherm แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ด้วยพันธะที่แข็งแรง

Chotpantararat and Amasvata (2020) ได้ศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการเคลื่อนที่ของอาร์ชีเนตผ่านคอลัมน์อิมมิตัวที่บรรจุวัสดุที่แตกต่างกัน นั่นคือ ทราย, ทรายที่ถูกเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (Iron oxide-coated sand) และทรายที่ถูกเคลือบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero-valent iron oxide-coated sand) ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และ 7 โดยสารละลายอาร์ชีเนตความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm ไหลผ่านคอลัมน์ทรายอิมมิตัวด้วยความเร็วคงที่ 2.3 เมตรต่อวัน พบว่า ที่พีเอช 4 กราฟ Breakthrough curves มีค่า C/C_0 เท่ากับ 1 ที่ Pore volume ที่ 31 ในขณะที่เดียวกันที่พีเอช 7 กราฟ Breakthrough curves มีค่า C/C_0 เท่ากับ 1 ที่ Pore volume ที่ 11 ซึ่งมีค่า Retardation factor เท่ากับ 10.17 และลดลงเหลือ 6.03 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจากพีเอช 4 เป็นพีเอช 7 เช่นเดียวกันค่า Removal capacity ของอาร์ชีเนตระหว่างที่เคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมมิตัวเท่ากับ 0.0027 และ 0.0022 ที่พีเอช 4 และพีเอช 7 ตามลำดับ เนื่องจากทรายที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์มีค่า

pH_{pzc} เท่ากับ 5 ดังนั้นที่พีเอช 4 ประจุบนพื้นผิวของทรายเป็นบวกจึงดูดซับอาร์ซิเนตไว้ได้ แต่ที่พีเอช 7 พื้นผิวของทรายเป็นลบจึงผลักให้อาร์ซิเนตเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ได้เร็วกว่าดังแสดงในค่า Retardation factor และจากการใช้โปรแกรม Hydus-1D model พบว่า แบบจำลอง Equilibrium model สอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทรายอ้อมตัวมากกว่าแบบจำลอง The two-site model โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.9763 และ 0.9913 ที่พีเอช 4 และพีเอช 7 ตามลำดับ

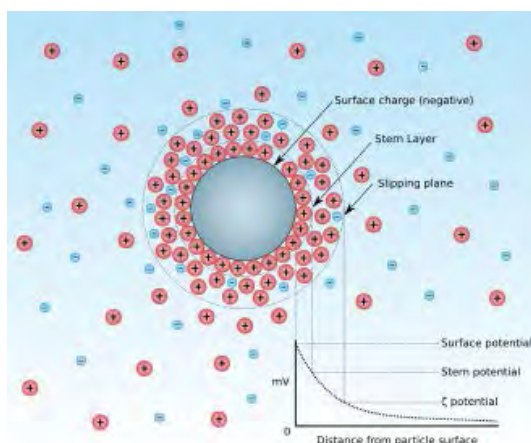
Ren และคณะ (2014) ได้ศึกษาการดูดซับอาร์ซิเนตและอาร์ซิโนซบนมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการดัดแปลงโดยการเติม Fe-polycations solution (Fe-M) และ Cetyltrimethylammonium bromide (CTMAB) โดยวิธีแบบแบทช์ (Batch experiment) พบว่า โดยทั่วไปมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (D-spacing) เท่ากับ 1.52 nm และเพิ่มขึ้นเมื่อเติม CTMAB เข้าไปแสดงถึงการเข้าไปอยู่ใน Inter layer ของมอนต์มอริลโลไนต์ แต่เมื่อเติม Fe-M ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้น Fe-M ไม่ได้อยู่ใน Inter layer และอยู่ตรงผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของพื้นผิวด้วย X-ray photoelectron spectroscopy พบว่ามีออกซิเจน (O) และซิลิคอน (Si) มากกว่าอลูมิเนียม (Al) แคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) โดยอะตอมของออกซิเจนมีความสำคัญในการบวนาการดูดซับอาร์ซิเนต ซึ่งมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปลงจะมีความสามารถในการดูดซับอาร์ซิเนตได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ทั่วไป และจากการทดลองค่าพีเอชที่เกิดขึ้นจะแปรผันกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

2.1.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์พบได้ทั่วไปในชั้นใต้ผิวดิน (Sen et al., 2004) และความเข้มข้นตามธรรมชาติของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำใต้ดินมีค่า 10⁸ ถึง 10¹⁷ อนุภาคต่อลิตร (Kim, 1991) อนุภาคคอลลอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร (DeNovio et al., 2004) นอกจากนี้คอลลอยด์ตามธรรมชาติยังรวมไปถึงเศษดิน หิน แร่ และเศษสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ที่มีขนาดดังกล่าวด้วย (Posadas et al., 2001) การทดลองในรูปแบบของคอลัมน์ในห้องปฏิบัติการเป็นที่นิยมในการศึกษาเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีรูพรุน ข้อดีของการทดลองคอลัมน์คือสามารถควบคุมเงื่อนไขการทดลองได้ รวมถึงสามารถศึกษาแยกตัวแปรในระบบที่เราสนใจได้เช่นกัน (Ryan and Elimelech 1996) ซึ่งตัวกลางที่นิยมใช้ในการทดลอง เช่น ทรายควอตซ์ แต่มีข้อเสียหลักคือในระบบแบบจำลองเหล่านี้อาจไม่ได้มีความซับซ้อนเท่าระบบจริงในธรรมชาติ

ประจุที่พื้นผิวของของแข็งที่ล้อมรอบด้วยไอออน จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชั้น Stern layer เป็นชั้นของประจุที่สัมผัสตรงข้ามกับอนุภาค โดยจะจับกับอนุภาคด้วยแรงผลัทางไฟฟ้าที่แข็งแรง ประจุในชั้นนี้จะเคลื่อนที่ไปกับอนุภาคโดยไม่มีการเคลื่อนไหวของประจุกับตัวกลาง (ศรีณย์ ต้นตะราชวงศา และธวัชชัย แพชมัด, 2556) และชั้นนอก ค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) คือค่าของประจุที่พื้นผิวของของแข็งที่ล้อมรอบด้วยไอออนในสารละลาย โดยวัดค่าความต่างศักย์ที่ชั้นนอกสุดของไอออนที่ล้อมรอบของแข็งและตัวกลางที่เป็นของเหลว ดังรูปที่ 2.4 และสามารถแบ่งศักย์ซีตาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงศักย์ซีตาเป็นบวก เมื่อพีเอชต่ำกว่าค่า Isoelectric Point: IEP (จุดที่มีค่า Zeta potential เท่ากับศูนย์) และช่วงที่มีค่าศักย์ซีตาเป็นลบ

เมื่อพีเอชมีค่ามากกว่าค่า IEP ซึ่งค่าศักย์ซีตาและค่า IEP จะแปรผันตามชนิดของของแข็ง ชนิดของสารละลาย และพีเอชที่เปลี่ยนไป (ธนิศร์ มีบุปผา และจตุพล โอภาไพบูลย์, 2555) ซึ่งค่าของศักย์ภาพซีตาเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสถียรที่อาจเกิดขึ้นของคอลลอยด์ ถ้าอนุภาคคอลลอยด์มีค่าศักย์ซีตาเป็นลบหรือบวกมากจะมีแนวโน้มที่จะผลักซึ่งกันและกัน และจะไม่มีแนวโน้มที่อนุภาคจะมารวมตัวกัน อย่างไรก็ตามหากอนุภาคมีค่าศักย์ซีตาต่ำจะทำให้อนุภาคที่มารวมตัวกันและตกตะกอน ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถแบ่งระหว่างสารแขวนลอยที่เสถียรและไม่เสถียรที่ค่าศักย์ซีตาเท่ากับ +30 หรือ -30 mV โดยอนุภาคที่มีศักย์ซีตาบวกมากกว่า +30 mV หรือมากกว่าลบ -30 mV ถือว่าเสถียร



รูปที่ 2.4 ค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) ของพื้นผิวของแข็งที่ล้อมรอบด้วยไอออนในสารละลาย (ที่มา https://en.wikipedia.org/wiki/Point_of_zero_charge)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ 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) เป็นต้น

Patil (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของค่าพีเอชและความแรงไอออนต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของค่าพีเอชและค่าความแรงไอออนที่แตกต่างกันโดยมีอัตราการไหลของน้ำคงที่ในตัวกลางที่เป็นทรายควอตซ์ ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้มีการสะสมของคอลลอยด์ในคอลัมน์ลดลง เนื่องจากค่าพีเอชมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะสมจึงลดลงเมื่อมีสภาพความเป็นกรดลดลง

Knappenberger และคณะ (2015) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์ที่มีรูปร่างทรงกระบอกและทรงกลมในตัวกลางที่มีรูพรุนที่ไม่อิ่ม (Unsaturated) ตัวกลางได้สภาวะการไหลที่คงตัว พบว่า ความเข้มข้นของคอลลอยด์ที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) มากกว่าคอลัมน์ทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) เนื่องจากการมีปริมาณน้ำน้อยจะเพิ่มอัตราในการสะสมตัวของคอลลอยด์ มีผลยับยั้งการ

เคลื่อนที่ของคอลลอยด์ โดย Roth และคณะ (2015) พบว่าอนุภาคคอลลอยด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจากการรวมตัว (Aggregation) นำไปสู่การตกสะสมตัวและการลดลงของความพรุนในตัวกลาง

2.1.5 การดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดซับสารปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนไปได้ไกลมากขึ้นหรืออาจชะลอการปนเปื้อนได้จากการเหล่านั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคคอลลอยด์หรืออัตราการใช้ของน้ำ ซึ่ง Ryan และ Elimelech (1996) พบว่าหลักเกณฑ์สำคัญในการเคลื่อนที่และดูดซับของอนุภาคคอลลอยด์จะต้องมีความเสถียรและต้องมีอนุภาคคอลลอยด์ในปริมาณที่เพียงพอต่อการดูดซับโลหะหนักจำนวนมาก

Tang และ Weisbrod (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนที่ของตะกั่ว (Pb) ในรอยแตกของหินโดยใช้แรมอนต์โมริลโลไนต์และกรดฮิวมิก (Humic acid ผลการวิจัยพบว่าตะกั่วมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของอนุภาคคอลลอยด์ผ่านรอยแตกในเนื้อหินเหล่านั้น

Lee และคณะ (2018) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์และโลหะหนักในตัวอย่างดินจาก Duckum ในเกาหลีใต้ โดยกำหนดให้สารละลายที่เตรียมจากตัวอย่างดินมีอัตราการใช้ที่แตกต่างกันในคอลัมน์ทราย และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เพื่อศึกษาผลความแรงไอออน (Ionic strength) ต่อการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์ พบว่า ความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการใช้ต่ำ และความเข้มข้นของคอลลอยด์เมื่อไม่มีผลของความแรงไอออนมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของคอลลอยด์ที่มีค่าความแรงไอออนเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยที่พีเอช 9.2 ความเข้มข้นของคอลลอยด์สูงกว่าที่พีเอช 7.3 เมื่อไม่มีผลของความแรงไอออน (Ionic strength) และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโลหะหนักพบว่า ความเข้มข้นของอาร์ซีนิก (As) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) เหล็ก (Fe) อลูมิเนียม (Al) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) ไม่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของโลหะหนักที่มีผลต่อการเร่งหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์

2.2 ทฤษฎี

2.2.1 ค่า Retardation factor

ค่า Retardation factor คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของการปนเปื้อนต่อความเร็วของน้ำ สามารถบอกความเร็วการเคลื่อนที่ของการปนเปื้อนจากโลหะได้ว่าเคลื่อนที่ช้ากว่าน้ำกี่เท่า โดยหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของข้อมูลจากการศึกษาไอออนของโลหะหนัก โดยการประมาณพื้นที่เหนือกราฟขาขึ้นของกราฟ Breakthrough จากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดที่มีความเข้มข้นสัมพัทธ์ (C/C_0) เท่ากับ 1.0 (Nkedi-Kizza et al., 1987) ซึ่งสามารถคำนวณค่า Retardation factor ได้จากสมการ :

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

สมการ 1 Retardation factor

โดยที่ C_i (mg / L) คือความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลออกมาที่เวลา i
 C_0 (mg / L) คือความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก
 PV_1 คือจำนวนของปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ (C_i/C_0) เท่ากับ 1.0

2.2.2 Hydrus-1D Program

แบบจำลอง Hydrus-1D สามารถใช้ในการจำลองการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักใน
 ตัวกลางมีรูพรุนที่อิ่มตัว (Simunek, J. & van Genuchten, 2008) แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้กับการไหล
 ในสถานะที่มีสมดุลทางกายภาพและไม่สมดุลทางเคมี ทั้งแบบจำลองทางตรง (Direct model) และ
 แบบจำลองผกผัน (Inverse Model)

The two-site model เป็นแบบจำลองเพื่อใช้ในการอธิบายการไหลในสถานะไม่สมดุลทางเคมี โดย
 สันนิษฐานว่าแบ่งการดูดซับเป็นสองส่วน คือ การดูดซับแบบสมดุล (Instantaneous sorption) และการดูด
 ซซับแบบไม่สมดุล (Kinetic sorption) (Chotpantararat and Amasvata, 2020) สามารถอธิบายด้วยสมการที่
 2 ดังนี้:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial s^e}{\partial t} + \rho \frac{\partial s^k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial v_x C}{\partial x} \pm \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right]_{rxn} \quad 2a$$

$$s^e = f K_f C^{1/n}, \quad 2b$$

$$\rho \frac{\partial s^k}{\partial t} = \alpha_k \rho (s_e^k - s^k) - \varphi_k, \quad 2c$$

$$s^k = (1 - f) K_f C^{1/n} \quad 2d$$

สมการ 2 Chemical non-equilibrium process

โดยที่ S^e คือ ความเข้มข้นของอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับในบริเวณ Instantaneous sites (mg/g soil)
 S^k คือ ความเข้มข้นของอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับในบริเวณ Kinetic sites (mg/g soil)
 f คือ ส่วนของบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนในสถานะสมดุล
 α_k คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับขั้นแรกของการเคลื่อนตัวของสารละลายในคอลัมน์ (1/day)
 φ_k คือ Sink-source บริเวณที่มีการดูดซับ (Kinetic sorption sites) (mg/(L day))

C คือ ความเข้มข้นของอาร์ซีเนต (mg/l)

K_d คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ สามารถแทนที่ด้วย Freundlich และ Langmuir parameters (L/M)

แบบจำลอง Linear/nonlinear equilibrium convection-dispersion (CD_{eq}) ใช้ในการอธิบายการไหลในสภาวะสมดุล ดังแสดงในสมการที่ 3 ดังนี้:

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

สมการ 3 Linear/nonlinear equilibrium convection-dispersion(CD_{eq})

โดยที่ C (mg/l) คือ ความเข้มข้นของอาร์ซีเนตในรูพรุน (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 ความเข้มข้นของอาร์ซีเนตในทราย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง

1. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10)

มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ประมาณ 30 มิลลิอีควิวเลนซ์/100 กรัม และพื้นที่ผิวคือ 250 ลูกบาศก์เมตร/กรัม

2. เม็ดทราย (Ottawa sand)

เม็ดทราย (Ottawa sand) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มม. ถึง 0.8 มม. โดยทรายควอตซ์ทั่วไปมีค่าความพรุนยังผล (effective porosity) 0.32 และความหนาแน่น 1.43 กรัม / ซม.³

3. สารละลายอาร์ซีเนต

เตรียมสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้น 1000 ppm จาก Di-Sodium hydrogen arsenate heptahydrate ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ในแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

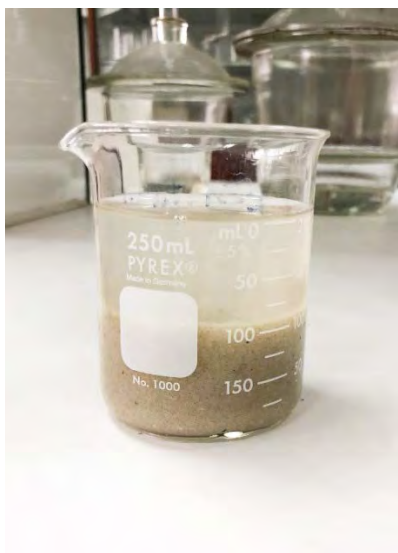
1. ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลกระทบของอนุภาคคอลลอยด์ต่อการเคลื่อนตัวของสาร การเคลื่อนที่ของอาร์ซีเนตในคอลัมน์ทรายอิมมัตว รายงานการปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทย และขั้นตอนการทดลองในคอลัมน์ทรายอิมมัตวตามวิธีการศึกษาของ Chotpantararat และ Kiatvarangkul (2018)

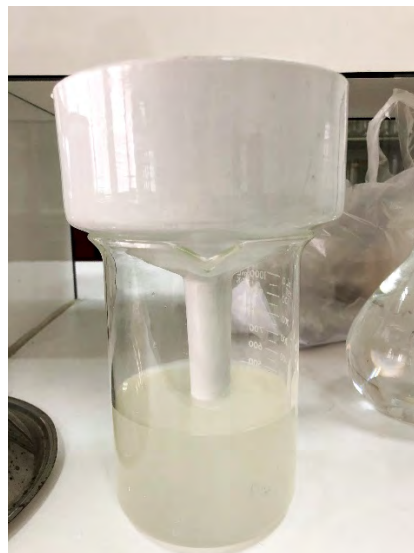
2. ออกแบบการทดลองและเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง

2.1 การเตรียมทรายเพื่อบรรจุในคอลัมน์

- 1) กำจัดโลหะออกไซด์และอนุภาคอื่นๆบนผิวทราย (Ottawa sand) โดยล้างทรายด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.01 M เป็นเวลา 30 นาที ในเครื่องอัลตราโซนิก แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- 2) ล้างด้วยสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.01 M เป็นเวลา 30 นาที ในเครื่องอัลตราโซนิก แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- 3) อบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) เก็บไว้ในภาชนะที่มีสารดูดความชื้น



รูปที่ 3.1 ทรายที่ผ่านการล้างด้วย NaOH และ HNO_3 ในเครื่องอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกรองเพื่อกำจัดโลหะออกไซด์ และอนุภาคอื่นๆบนผิวทราย

2.2 การเตรียมสารแขวนลอยมอนต์มอริลโลไนต์

- 1) ล้างมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite K10) 20 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำสารแขวนลอยด้านบนซึ่งมีปริมาตรเป็นครึ่งหนึ่งของทั้งหมดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) เติมแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 M โดยใช้อัตราส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ 1 กรัม ต่อแคลเซียมคลอไรด์ 20 มิลลิลิตร แล้วเขย่าโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) แยกมอนต์มอริลโลไนต์ออกมาโดยวิธีรินสารละลายใสออกจากตะกอน (Decantation)
- 5) ล้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) โดยใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร จนไม่มีคลอไรด์ไอออน (ค่า EC เท่ากับศูนย์) แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) วิเคราะห์ขนาดของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ได้จากการเตรียม โดยใช้เครื่อง Malvern Zetasizer Nano ที่คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 สารละลายมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 3.4 การแยกชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 M

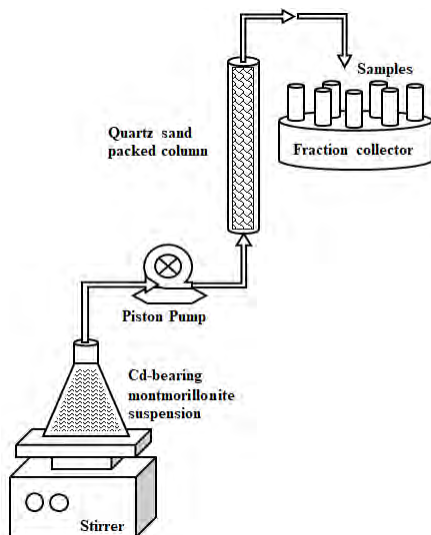
2.3 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนต

- 1) เตรียมสารละลายอาร์ซิเนตความเข้มข้น 1000 ppm จาก Di-Sodium hydrogen arsenate heptahydrate ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ในแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M
- 2) ใส่มอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ 400 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัม/ลิตร) ลงในขวดปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้ววางในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- 3) เติมสารละลายอาร์ซิเนตที่เตรียมจาก 1) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์
- 4) ปรับ pH ของสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนต ให้มี pH เท่ากับ 4, 7 และ 10 โดยการเติม NaOH ความเข้มข้น 1 M และ HNO_3 ความเข้มข้น 1 M
- 5) จะได้สารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนต 500 มิลลิลิตร โดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนตความเข้มข้น 100 และ 10 ppm ตามลำดับ

2.4 การเตรียมชุดการทดลองคอลัมน์

- 1) ล้างคอลัมน์อะคริลิก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 2.5 ซม. และยาว 10 ซม. ด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.01 M และ HNO_3 ความเข้มข้น 0.01 M ตามลำดับ
- 2) ติดตั้งชุดการทดลองคอลัมน์ โดยใช้ท่อเทปลอนเชื่อมต่อสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์และอาร์ซิเนตเข้ากับปั๊ม และเชื่อมต่อปั๊มเข้ากับส่วนล่างของคอลัมน์ เพื่อสูบสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ จากทางด้านล่างของคอลัมน์ จากนั้นต่อท่อเทปลอนจากส่วนบนของคอลัมน์กับเครื่อง Fraction collector เพื่อเก็บตัวอย่างสารละลายที่ไหลออกจากคอลัมน์ ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6

- 3) บรรจุทราย (Ottawa sand) ในคอลัมน์ โดยวิธี Wet packing method นั่นคือ ค่อยๆใส่ทรายลงในคอลัมน์ หยดน้ำลงไปเพื่อแทนที่อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายด้วยน้ำ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบรรจุทราย 1 คอลัมน์มีค่าเท่ากับ 1 Pore volume (PV) คอลัมน์ที่บรรจุทรายเรียบร้อยแล้ว จะมีค่า 1 Pore volume (PVs) ประมาณ 15.3-16.5 ซม³



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงชุดการทดลอง
(ที่มา: Wikiniyadhane, 2016)

รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองคอลัมน์ทรายอิมตัว

3. ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 วิธีการศึกษาผลของค่า pH ต่อการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตและมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมตัว

- 1) ก่อนทำการทดลองต้องทำการปรับเทียบความเร็วการไหลของน้ำด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยตั้งค่าให้ปั๊มสูบน้ำเข้าสู่คอลัมน์ด้วยความเร็วคงที่ 0.16 เซนติเมตร/ นาที จากนั้นให้ปั๊มสูบสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M ที่มี pH เท่ากับ 4 เข้าสู่คอลัมน์ เก็บตัวอย่างจนกว่าสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ออกมาจากคอลัมน์จะมี pH เท่ากับ pH ของสารละลายที่ใส่ไปในคอลัมน์โดยใช้เครื่อง Fraction Collector เพื่อให้การไหลอยู่ในสภาวะคงที่และปรับสภาพทางเคมีภายในคอลัมน์
- 2) สารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ประกอบด้วยอาร์ซิเนต โดยมี pH เท่ากับ 4 จะถูกคนด้วยเครื่อง Stirrer และปั๊มจะสูบสารละลายเข้าไปในคอลัมน์ทรายอิมตัว เก็บตัวอย่างสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆครึ่งชั่วโมงจนครบ 20 Pore volume

- 3) เปลี่ยนให้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 M ที่มี pH เท่ากับ 4 ไหลเข้าสู่คอลัมน์ทรายอิมมัวอีกครั้ง แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ต่อจนครบทั้งหมด 30 Pore volume และใช้ตัวแทนของแต่ละ Pore volume ไปวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 4) ทำการทดลองตามข้อ 1, 2, และ 3 โดยเปลี่ยนเป็นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ที่ประกอบด้วยอาร์ซิเนตที่มี pH เท่ากับ 7 และ 10 ตามลำดับ

3.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอาร์ซิเนตที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมมัว

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอาร์ซิเนตจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอาร์ซิเนตในสารละลาย และความเข้มข้นของอาร์ซิเนตทั้งหมด ซึ่งอาร์ซิเนตทั้งหมดคืออาร์ซิเนตในสารละลายรวมกับอาร์ซิเนตบนผิวของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

3.3.1) การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอาร์ซิเนตในสารละลาย

- 1) ปริมาณครึ่งหนึ่งของ 1 pore volume จะถูกปั่นแยกที่ 5000 rpm เป็นเวลา 20 นาที
- 2) กรองผ่าน Syringe filter ขนาด 0.22 ไมโครเมตร อาร์ซิเนตที่อยู่ในสารละลายจะผ่านกระดาษกรอง
- 3) วิเคราะห์ความเข้มข้นอาร์ซิเนตในสารละลายโดยใช้ Atomic absorption spectroscopy ที่โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์

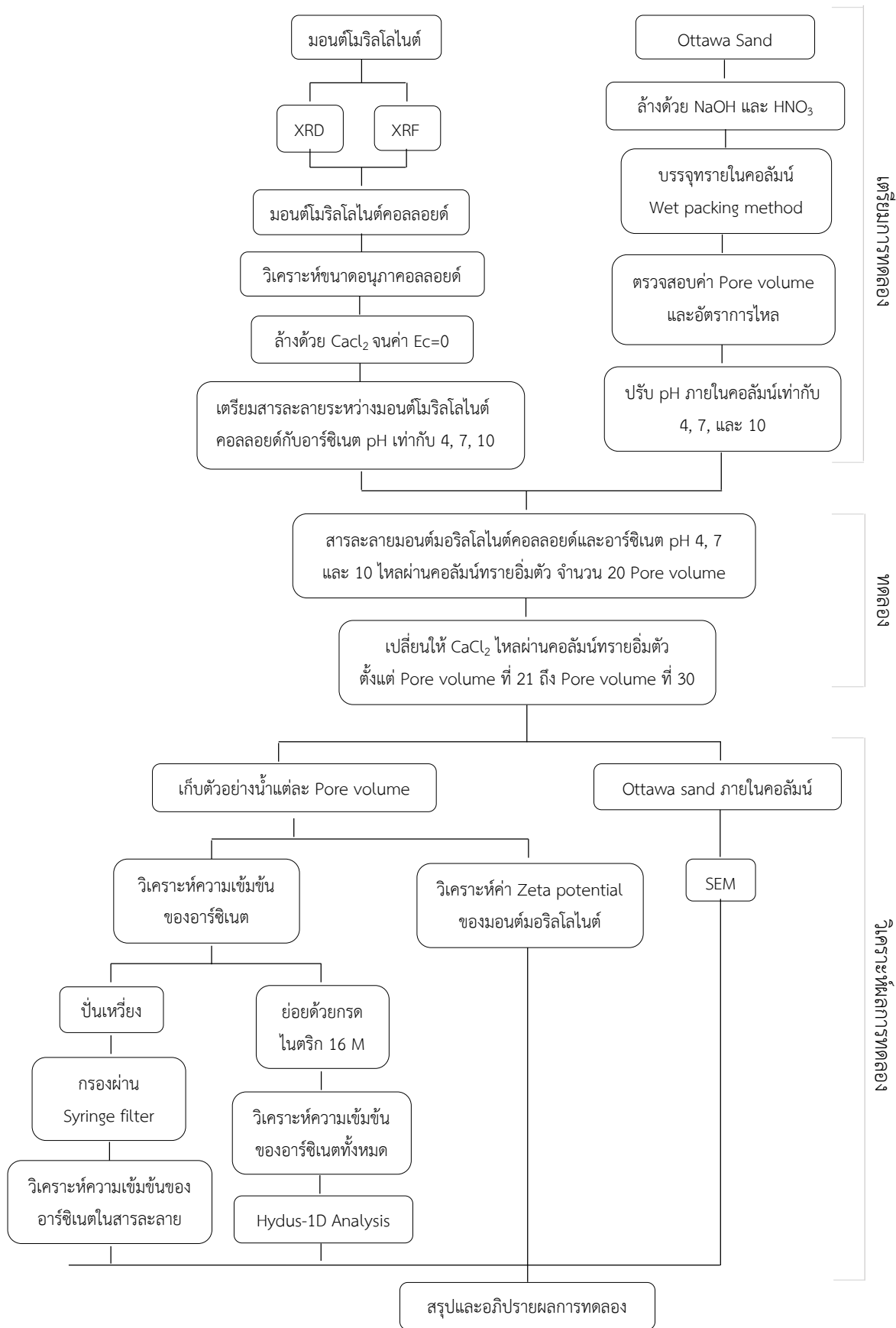
3.3.2) การวิเคราะห์ความเข้มข้นรวมของอาร์ซิเนตทั้งหมด

- 1) เติมนกรดไนตริกความเข้มข้น 16 M โดยอัตราส่วนกรดไนตริกต่อสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 1 ต่อ 1 ในส่วนที่เหลือของ pore volume
- 2) ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียสในตู้ดูดควัน
- 3) วิเคราะห์ความเข้มข้นอาร์ซิเนตทั้งหมดโดยใช้ Atomic absorption spectroscopy ที่โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์
- 4) วิเคราะห์ผลความเข้มข้นของอาร์ซิเนตทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม Hydus-1D

3.3 การวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM) ของผิวทราย

วิเคราะห์ธาตุต่างๆที่อยู่บริเวณพื้นผิวของทราย และลักษณะพื้นผิวทราย โดย Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL,JSM-6610LV and Oxford, X-maxn 50) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ตีความผลการวิเคราะห์ข้อมูล
5. สรุปและอภิปรายผลการศึกษา



รูปที่ 3.7 Flowchart ขั้นตอนการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ก่อนการทดลอง

จากการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการสูบลำดับปริมาตรครั้งหนึ่งของสารละลายมอนต์โมริลโลไนต์ที่ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง Malvern Zetasizer Nano โดยใช้ค่าดัชนีการหักเหแสง (Refractive Index) ของมอนต์โมริลโลไนต์เท่ากับ 1.52 พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 473.97 นาโนเมตร (ตารางที่ 1) สอดคล้องกับการศึกษาของ Kretzschmar และคณะ (1999) ที่พบว่าของแข็งสามารถเคลื่อนที่เหมือนอนุภาคคอลลอยด์ได้ ทั้งในในกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกต (กลุ่มแร่ดิน) อินทรีย์วัตถุและอื่นๆ โดยมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ดังนั้นอนุภาคที่ได้จึงเป็นอนุภาคคอลลอยด์ของมอนต์โมริลโลไนต์

ตารางที่ 4.1 ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์

ครั้งที่	ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (nm)
1	491.10
2	456.90
3	473.90
เฉลี่ย	473.97
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	17.10

4.2 การเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตโดยมอนต์โมริลโลไนต์คอลลอยด์ในคอลัมน์ทรายอิมมัวที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10

สารละลายมอนต์โมริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนตที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10 จะเคลื่อนที่เข้าสู่คอลัมน์ทรายอิมมัว ด้วยความเร็วในการไหลคงที่ เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนต โดยคอลัมน์ทรายอิมมัวที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.2

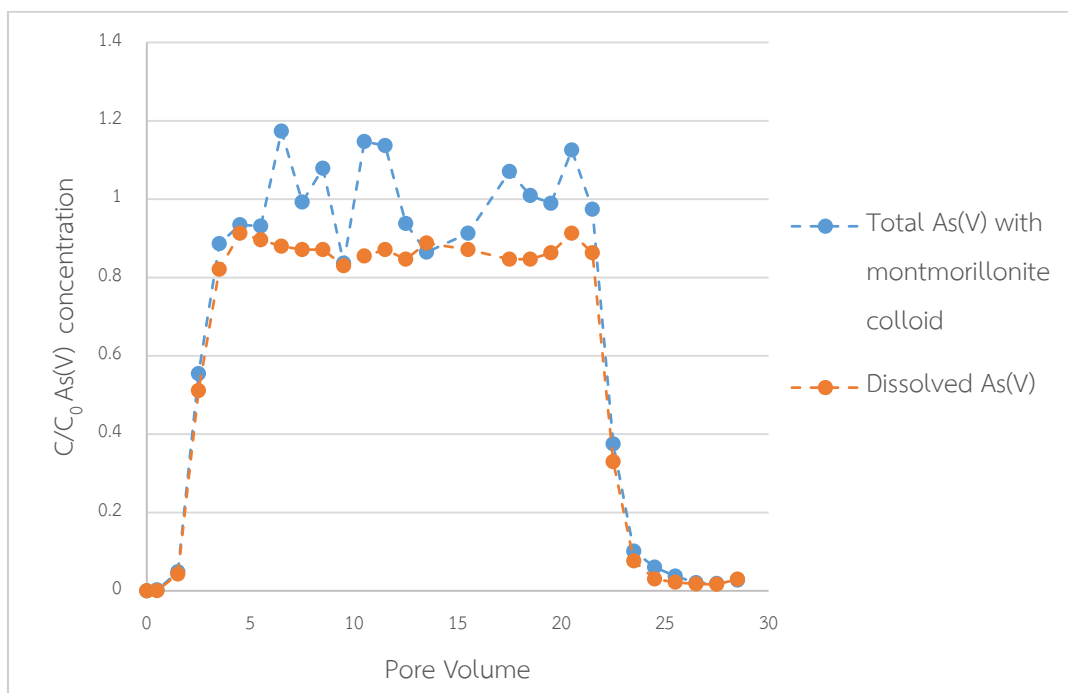
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของคอลัมน์ทรายอิมมัวที่ใช้ในการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10

คอลัมน์ ที่	พีเอช	ความยาว (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ หนาแน่น รวม (กรัม/ซม. ³)	ความ พรุน (-)	ปริมาตร รูพรุน (ซม. ³)	ความเร็วใน การซึมผ่าน (เมตร/วัน)	ค่าความ แรงไอออน (มิลลิโม ลาร์)
1	4±0.25	10	2.50	1.64	0.39	15.81	2.29	0.003
2	7±0.04	10	2.50	1.61	0.41	16.57	2.29	0.003
3	10±0.39	10	2.50	1.67	0.38	15.39	2.29	0.003

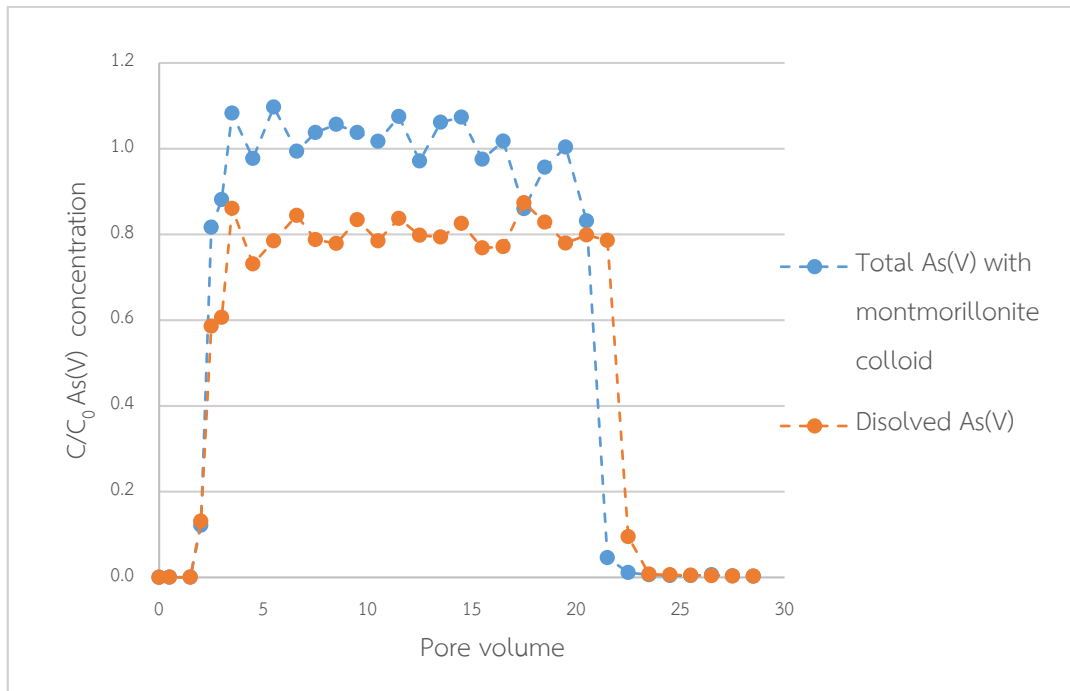
ผลการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทรายอิมิตัวซึ่งมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟ breakthrough curve ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของอาร์ซิเนตที่เคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายอิมิตัวต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ซึ่งเป็นปริมาตรของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ทรายต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างตะกอนทรายภายในคอลัมน์ (รูปที่ 4.1, 4.2, 4.3) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์ซิเนตและมอนต์มอริลโลไนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนตที่ค่าพีเอชต่างๆ

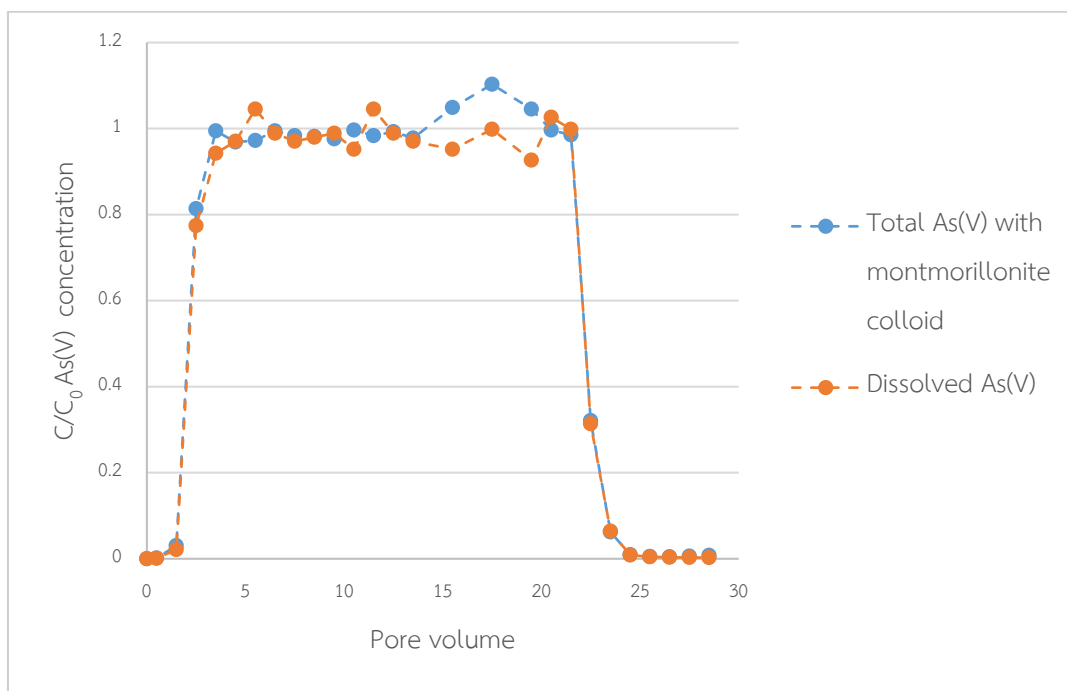
คอลัมน์ ที่	พีเอช	อาร์ซิเนตใน สารละลาย (ppm)	อาร์ซิเนตทั้งหมด (ppm)	อาร์ซิเนตบนผิวของ มอนต์มอริลโลไนต์ (ppm)	มอนต์มอริลโล ไนต์คอลลอยด์ (ppm)
1	4±0.25	10.49	12.05	1.56	100
2	7±0.04	9.97	12.40	2.77	100
3	10±0.39	10.54	10.72	0.18	100



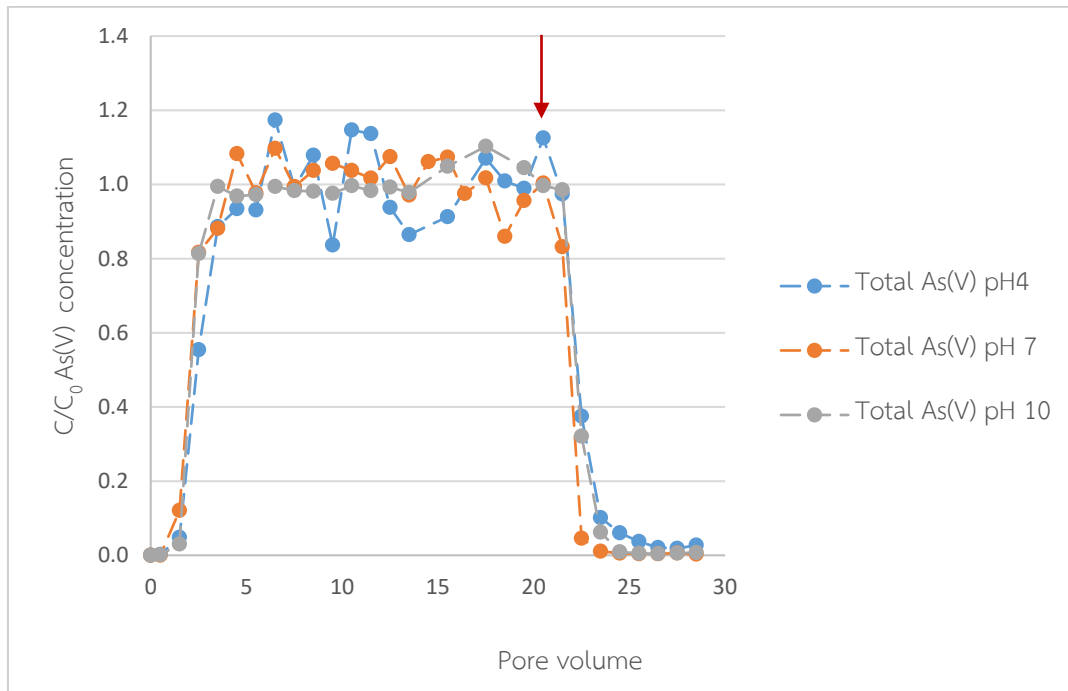
รูปที่ 4.1 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซิเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอช 4



รูปที่ 4.2 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอช 7

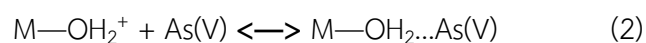
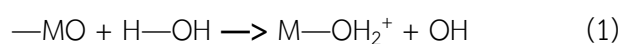


รูปที่ 4.3 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับปริมาตรรูพรุนที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ 4.4 กราฟ breakthrough ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับปริมาตรรูพรุนของอาร์ซีเนตทั้งหมดที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10

จากรูปจะเห็นว่าความเข้มข้นของอาร์ซีเนตทั้งหมด (Total As(V)) และอาร์ซีเนตในสารละลาย (Dissolved As(V)) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ และเมื่อเปลี่ยนให้ CaCl_2 ไหลในระบบแทนสารละลายมอนต์โมริลโลไนต์คอลลอยด์ที่มีอาร์ซีเนตอยู่ พบว่ายังคงมีอาร์ซีเนตค้างอยู่ในคอลัมน์ทรายอิมิตัวและค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยเมื่อคำนวณผลต่างของพื้นที่ใต้กราฟระหว่างปริมาตรกับความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่ออกมาจากคอลัมน์ของอาร์ซีเนตทั้งหมดและอาร์ซีเนตในสารละลายที่พีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10 พบว่าอาร์ซีเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์โมริลโลไนต์และเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์คิดเป็นร้อยละ 13.16, 16.32 และ 2.99 ของปริมาณอาร์ซีเนตทั้งหมดที่เข้าสู่คอลัมน์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) สอดคล้องกับการศึกษาของ Mohapatra และคณะ (2007) ที่ได้ศึกษากลไกการดูดซับอาร์ซีเนตของมอนต์โมริลโลไนต์ ด้วยวิธี Batch experiment พบว่าที่พีเอชระหว่าง 2 ถึง 5 การดูดซับอาร์ซีเนตค่อนข้างคงที่ โดยอาร์ซีเนตถูกดูดซับโดยมอนต์โมริลโลไนต์ 54% และลดลงเป็น 24% เมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 9 และการศึกษาของ Mathialagan และ Viraraghawan (2002) ที่พบว่าอะตอมของออกซิเจนที่ผิวของแร่ในกลุ่มแร่ดิน (Clay mineral) เกิดปฏิกิริยากับน้ำในสถานะที่เป็นกรด ทำให้เกิดประจุบวกที่พื้นผิว และสามารถดูดซับอาร์ซีเนตที่เป็นประจุลบได้ ดังสมการ (1) และ (2)



แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นพื้นผิวของแร่ในกลุ่มแร่ดินมีประจุเป็นลบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งขัดขวางการดูดซับอาร์ซิเนต ทำให้มีการดูดซับอาร์ซิเนตที่ต่ำ ดังสมการ (3)



ตารางที่ 4.4 ปริมาณอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์มอริลโลไนต์และเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์

คอลัมน์ ที่	พีเอช	อาร์ซิเนตทั้งหมดที่ เข้าสู่คอลัมน์ (mg)	ปริมาณอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับ และออกมาจากคอลัมน์ (mg)	ร้อยละของอาร์ซิเนต ที่ถูกดูดซับ
1	4±0.25	3.715	0.489	13.165
2	7±0.04	4.010	0.654	16.320
3	10±0.39	3.216	0.100	2.990

เมื่อพิจารณาค่า Retardation factor (RF) (ตารางที่ 4.5) จากพื้นที่เหนือกราฟ breakthrough โดยคำนวณจากระยะจุดเริ่มต้นถึงจุดที่ C/C_0 เท่ากับ 1 ซึ่งค่า Retardation factor คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วของสารปนเปื้อนต่อความเร็วของน้ำ หรือกล่าวได้ว่าความเร็วการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนช้ากว่าน้ำกี่เท่า พบว่าอาร์ซิเนตทั้งหมดที่พีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10 มีค่า Retardation factor เท่ากับ 4.57, 2.34 และ 2.29 ตามลำดับ ดังนั้นอาร์ซิเนตทั้งหมดที่พีเอชเท่ากับ 10 เคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์เร็วสุด รองลงมาเป็นอาร์ซิเนตทั้งหมดที่พีเอชเท่ากับ 7 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากที่พีเอช 4 อนุภาคมอนต์โมริลโลไนต์มีขนาด 1,150.5 nm ในขณะที่พีเอช 7 และ 10 มีขนาด 656.8 และ 306.06 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) จึงเกิดค้างอยู่ภายในคอลัมน์และเคลื่นที่ออกมาจากคอลัมน์ช้ากว่าที่พีเอชเท่ากับ 7 และ 10 ทำให้อาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์โมริลโลไนต์เคลื่นที่ออกมาจากคอลัมน์ช้าด้วย ทั้งนี้ที่พีเอชเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นสภาวะที่เป็นกรดมอนต์โมริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับอาร์ซิเนตสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 ทำให้ร้อยละของอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์โมริลโลไนต์และเคลื่นที่ออกมาจากคอลัมน์ที่พีเอชเท่ากับ 4 สูงกว่าที่พีเอชเท่ากับ 10 แต่ต่ำกว่าที่พีเอชเท่ากับ 7 เนื่องจากมีผลของขนาดอนุภาคมอนต์โมริลโลไนต์เข้ามาเกี่ยวข้อง

ประจุบนผิวของมอนต์โมริลโลไนต์มีค่าเท่ากับศูนย์ (pH_{pzc}) เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 2.9 (Mohapatra et al., 2007) ในขณะที่ pH_{pzc} ของทรายมีค่าเท่ากับ 5 (Chotpantararat and Amasvata, 2020) ดังนั้นที่พีเอชเท่ากับ 4 ทรายจะมีประจุที่ผิวเป็นบวก แต่มอนต์โมริลโลไนต์จะมีประจุบริเวณพื้นผิวเป็นลบ (ตารางที่ 4.7) และอาร์ซิเนตซึ่งมีประจุรวมของโมเลกุลเป็นลบ ทำให้มอนต์โมริลโลไนต์และอาร์ซิเนตบางส่วนถูกดูดซับโดยทรายภายในคอลัมน์ จึงยังคงค้างอยู่ภายในคอลัมน์ทรายอิมตัว แต่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 10 ซึ่งสูงกว่า pH_{pzc} ทั้งประจุบนผิวของมอนต์โมริลโลไนต์และทรายจะเป็นประจุลบจึงมีการดูดซับอาร์ซิเนตโดย มอนต์โมริลโลไนต์ด้วยแรงทางไฟฟ้า และเกิดแรงผลักกระหว่างระหว่างมอนต์โมริลโลไนต์กับมอนต์โมริลโลไนต์ และมอนต์โมริลโลไนต์กับทราย ทำให้มอนต์โมริลโลไนต์ที่มีการดูดซับอาร์ซิเนตไว้เคลื่นที่ออกมาได้เร็ว จึงส่งผลให้อาร์ซิเนตเคลื่นที่ออกมาจากคอลัมน์ได้เร็ว

ตารางที่ 4.5 Retardation factor ของอาร์ซีเนตทั้งหมดที่พีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10

คอลัมน์ที่	พีเอช	อาร์ซีเนต	Retardation factor (RF)
1	4±0.25	อาร์ซีเนตทั้งหมด	4.57
2	7±0.04	อาร์ซีเนตทั้งหมด	2.34
3	10±0.39	อาร์ซีเนตทั้งหมด	2.29

ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

คอลัมน์ที่	พีเอช	ขนาดอนุภาคคอลลอยด์ (นาโนเมตร)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
1	4.0±0.25	-	1116	1185	1150.50	34.50
2	7.0±0.04	696.8	616.8	-	656.80	40.00
3	10±0.39	330.6	298.4	289.2	306.06	17.75

ตารางที่ 4.7 Zeta potential ของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์

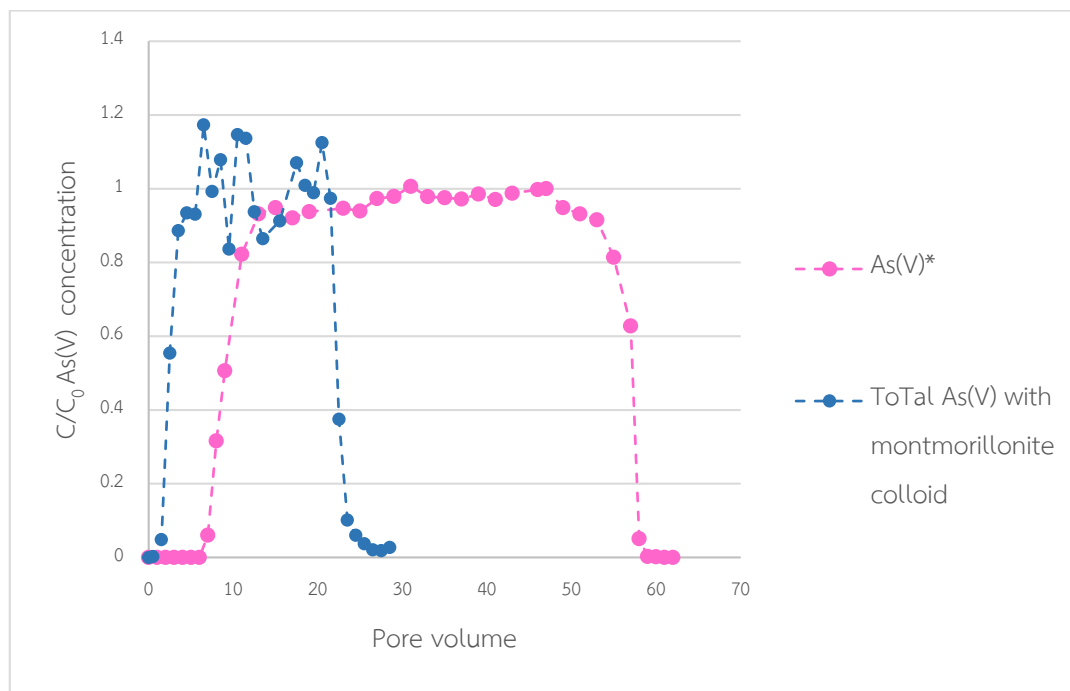
คอลัมน์ที่	พีเอช	Zeta potential อนุภาคคอลลอยด์ (mV)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
1	4.0±0.25	-14.8	-14.8	-13.1	-14.23	0.80
2	7.0±0.04	-2.88	-5.42	-7.93	-5.41	2.06
3	10±0.39	-32.6	-33.6	-35.8	-34.00	1.34

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับ Chotpantararat และ Amasvata (2020) ได้ศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการเคลื่อนที่ของอาร์ซีเนตผ่านคอลัมน์อิมมัลชันที่บรรจุวัสดุที่แตกต่างกัน นั่นคือ ทราย ทรายที่ถูกเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (Iron oxide-coated sand) และทรายที่ถูกเคลือบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero-valent iron oxide-coated sand) ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และ 7 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอลัมน์ทรายอิมมัลชันกับการศึกษาในครั้งนี้ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอลัมน์ทรายอิมิตัวที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10

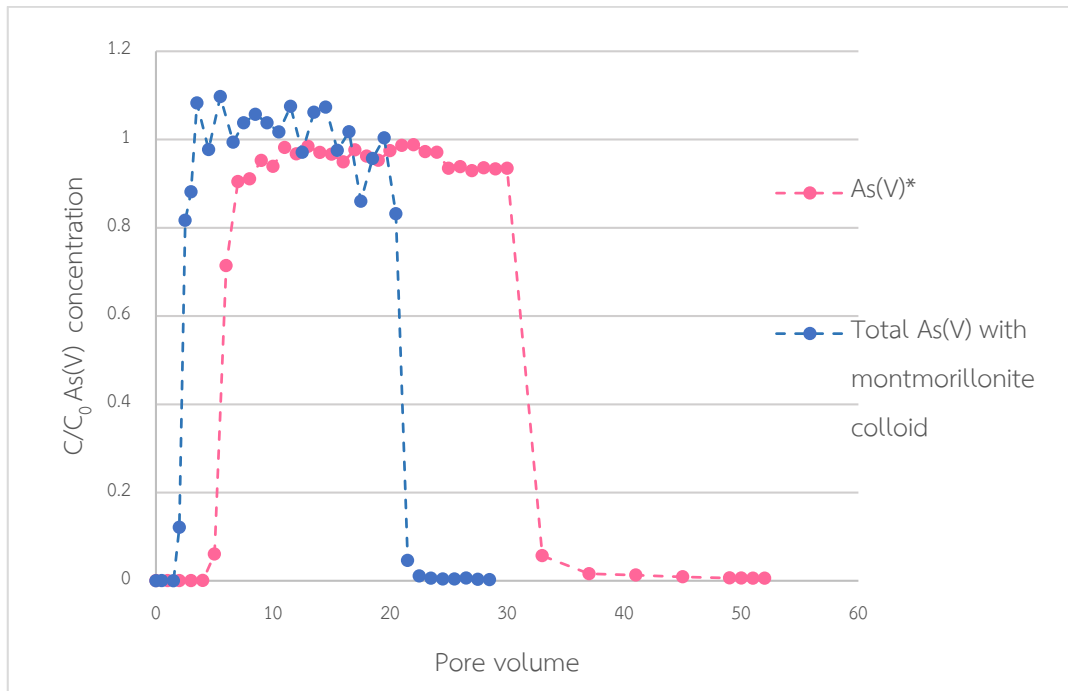
คอลัมน์ที่	พีเอช	ความยาว (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ หนาแน่นรวม (กรัม/ซม. ³)	ความพรุน (-)	ปริมาตร รูพรุน (ซม. ³)	ความเร็วใน การซึมผ่าน (เมตร/วัน)
1	4.0±0.25	10	2.50	1.64	0.39	15.81	2.29
1*	4.0±0.1	10	2.50	1.51	0.38	19.10	2.30
2	7.0±0.04	10	2.50	1.61	0.41	16.57	2.29
2*	7.0±0.2	10	2.50	1.51	0.38	19.08	2.30
3	10±0.39	10	2.50	1.67	0.38	15.39	2.29
3*	-	-	-	-	-	-	-

1*, 2*, 3* (Chotpantararat and Amasvata, 2020)



As(V)* (Chotpantararat and Amasvata, 2020)

รูปที่ 4.5 กราฟ breakthrough เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทรายอิมิตัว (As(V)) กับ อาร์ซิเนตที่มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ (Total As(V)) ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4



As(V)* (Chotpantararat and Amasvata, 2020)

รูปที่ 4.6 กราฟ breakthrough เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทรายอิมตัว (As(V)) กับ อาร์ซิเนตที่มีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ (Total As(V)) ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นว่าอาร์ซิเนตทั้งหมด ซึ่งมีผลของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เข้ามาเกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ภายในคอลัมน์ทรายอิมตัว เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ได้เร็วกว่าอาร์ซิเนตที่เคลื่อนที่ในคอลัมน์ทรายที่โดยไม่มีผลของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ ดังนั้นมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์มีผลทำให้อาร์ซิเนตเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ทรายอิมตัวเร็วขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 4 และ 7 และเมื่อเปรียบเทียบค่า Retardation factor (ตารางที่ 4.9) พบว่า อาร์ซิเนตทั้งหมดเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอาร์ซิเนตที่เคลื่อนที่ในคอลัมน์ทรายอิมตัวที่ไม่มีผลของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยมีร้อยละความแตกต่างของความเร็วในการไหลเท่ากับ 55.06 และ 61.19 ที่พีเอชเท่ากับ 4 และ 7 ตามลำดับ เนื่องจากที่พีเอช 4 ประจุบนพื้นผิวของทรายเป็นบวก มีการดูดซับอาร์ซิเนตไว้ จึงเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ได้ช้า ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีมอนต์มอริลโลไนต์ที่อยู่ในสภาวะเป็นกรด มีความสามารถในการดูดซับอาร์ซิเนตและเป็นพาหะให้อาร์ซิเนตเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ และที่พีเอช 7 ประจุบนพื้นผิวของทรายและมอนต์มอริลโลไนต์เป็นลบ จึงเกิดการผลักกัน ทำให้ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการดูดซับอาร์ซิเนตไว้เคลื่อนที่ออกมาได้เร็ว จึงส่งผลให้อาร์ซิเนตเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ได้เร็ว ดังที่กล่าวมาข้างต้น

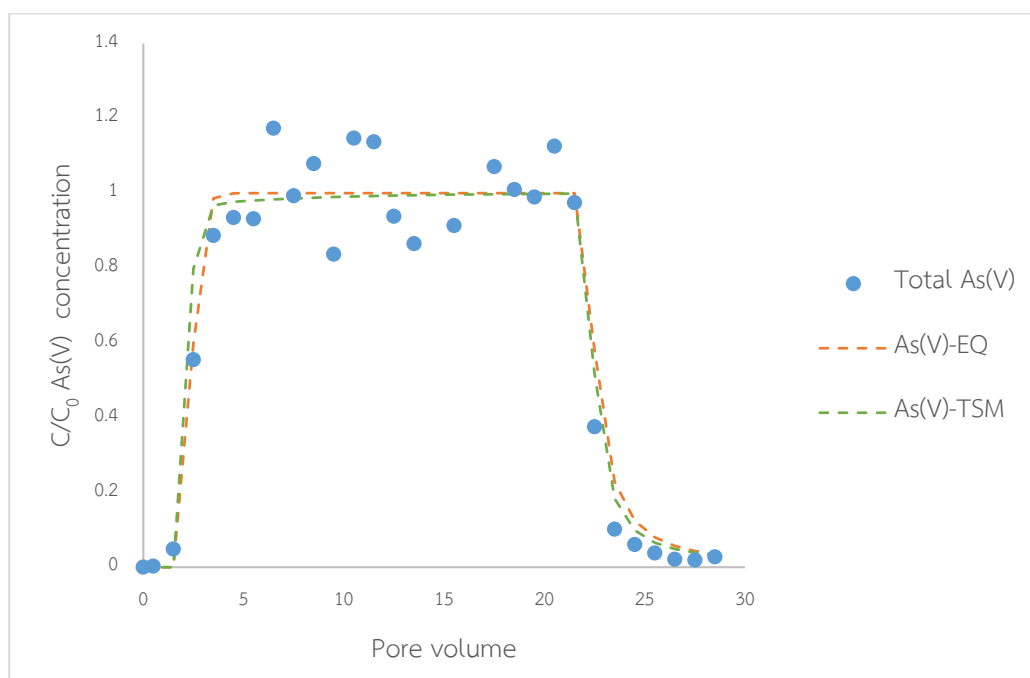
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบ Retardation factor ของอาร์ซิเนตเมื่อมีและไม่มีผลของมอนต์มอริลโลไนต์ในสารละลายที่พีเอช 4 7 และ 10

คอลัมน์ ที่	พีเอช	อาร์ซิเนต	ผลของ มอนต์มอริลโลไนต์	Retardation factor (RF)	% ความแตกต่าง ความเร็วในการไหล
1	4.0±0.25	อาร์ซิเนตทั้งหมด	มี	4.57	55.06
1*	4.0±0.1	อาร์ซิเนต	ไม่มี	10.17	
2	7.0±0.04	อาร์ซิเนตทั้งหมด	มี	2.34	61.19
2*	7.0±0.2	อาร์ซิเนต	ไม่มี	6.03	
3	10±0.39	อาร์ซิเนตทั้งหมด	มี	2.29	-
3*	-	อาร์ซิเนต	ไม่มี	-	

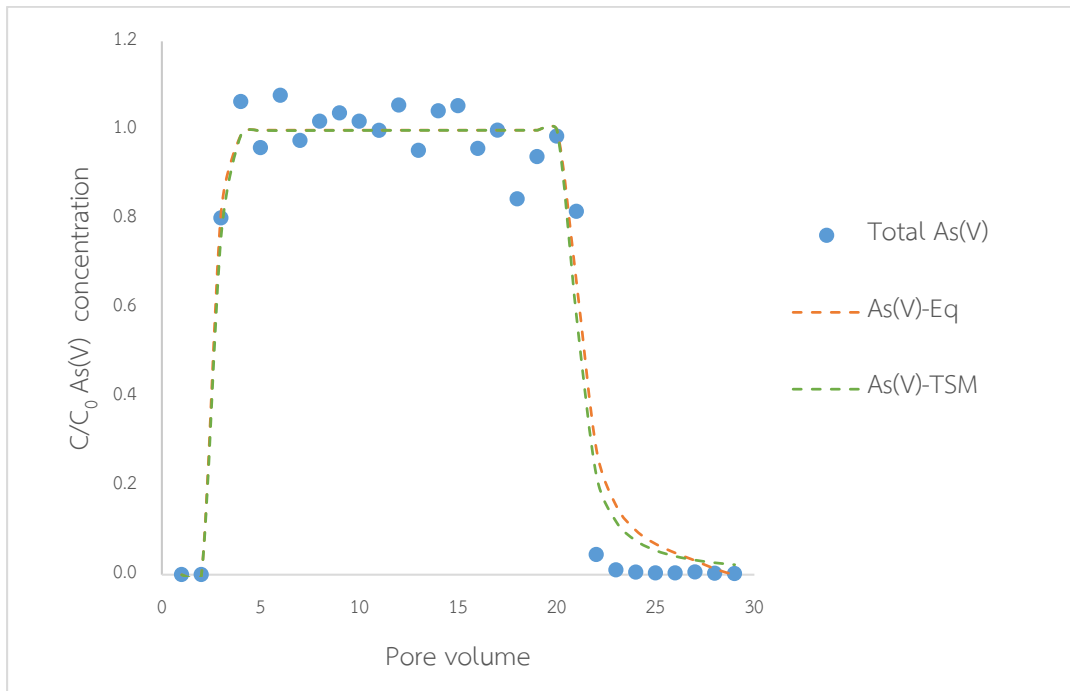
1, 2, 3* (Chotpantararat and Amasvata, 2020)

4.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตผ่านคอลัมน์ทรายอิมิตัว โดยโปรแกรม Hydrus-1D

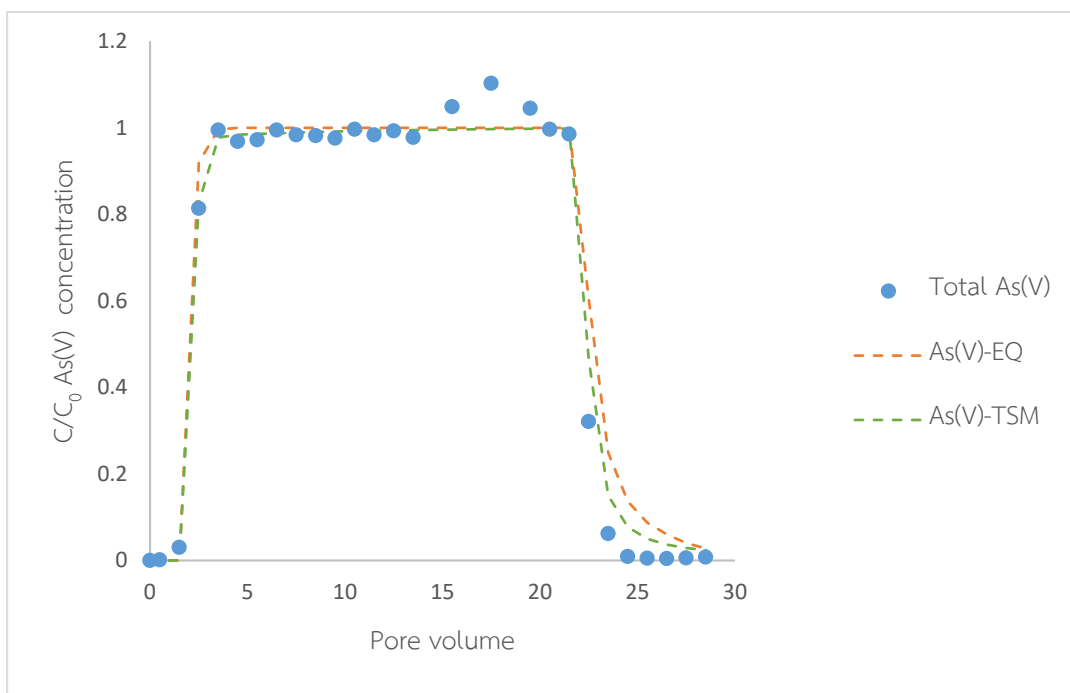
แบบจำลองโดยโปรแกรม Hydrus-1D อธิบายการไหลในสภาวะที่มีสมดุลทางกายภาพ (Physical equilibrium) และไม่สมดุลทางเคมี (Chemical non-equilibrium) โดยในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตผ่านคอลัมน์ทรายอิมิตัวใช้แบบจำลองในลักษณะผกผัน (Inverse Model) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากแบบจำลอง และใช้แบบจำลอง Linear/nonlinear equilibrium convection dispersion (CD_{eq}) เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ในสภาวะสมดุล และใช้ The two-site model (TSM) อธิบายการเคลื่อนที่ในสภาวะไม่สมดุลทางเคมี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.7 เส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve fitting) ของ Equilibrium model (Eq) และ The two-site model (TSM) ของอาร์ซีนทั้งหมด; (ก) กราฟ breakthrough curve ค่าพีเอชเท่ากับ 4, (ข) กราฟ breakthrough curve ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ (ค) กราฟ breakthrough curve ค่าพีเอชเท่ากับ 10

จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 10 เส้นโค้งที่เกิดจาก The two-site model (TSM) อธิบายการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตโดยมีผลของมอนต์มอริลโลไนต์มากกว่า Equilibrium model แสดงถึงการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัวในสภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium model) กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัวเป็นแบบ Kinetic sorption มากกว่า Instantaneous sorption โดยค่า R^2 ของแบบจำลอง Equilibrium model และ two-site model (TSM) (ตารางที่ 4.10) มีค่าเท่ากับ 0.9754 และ 0.9917 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า R-Squared ของแบบจำลอง Equilibrium model และ The two-site model (TSM) พีเอช 4 และพีเอช 7 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จึงสรุปได้ว่า การดูดซับของอาร์ซิเนตโดยมีผลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่พีเอชเท่ากับ 4 และ 7 ภายในคอลัมน์ทรายอิมตัวเป็นสภาวะสมดุล

จากข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม Hydrus-1D (ตารางที่ 4.10) จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ของฟรุนดริช (Freundlich constants, K_F) ของแบบจำลอง Equilibrium model ลดลงจาก 4.363 เป็น 4.094 และ 3.714 เช่นเดียวกับ Nonequilibrium model ก็ลดลงจาก 4.763 เป็น 4.672 และ 3.778 ที่พีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10 ตามลำดับ สอดคล้องกับการลดลงของค่า Retardation factor ที่ลดลงจาก 4.57 เป็น 2.34 และ 2.29 ที่พีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10 ตามลำดับ

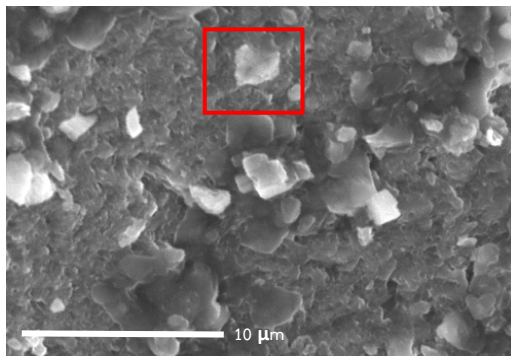
เมื่อเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม Hydrus-1D ของการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทรายอิมตัว โดยมีและไม่มีผลของมอนต์มอริลโลไนต์จากการศึกษาของ จาก Chotpantararat และ Amasvata (2020) พบว่าเมื่อปราศจากผลของมอนต์มอริลโลไนต์ อาร์ซิเนตถูกดูดซับที่ในสภาวะสมดุล อธิบายโดยเส้นโค้งที่เกิดจาก Equilibrium model ทั้งพีเอชเท่ากับ 4 และ 7 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ ดังนั้นการมีมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับและเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตที่พีเอชเท่ากับ 4 และ 7 หากแต่เริ่มเห็นพฤติกรรมการดูดซับและเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตเริ่มเปลี่ยนเป็นแบบจำลองแบบ two-site model (TSM) ด้วยค่า R^2 เท่ากับ 0.9917 และมีค่า f (fraction of equilibrium site) เท่ากับ 0.829 เนื่องจากขนาดของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เล็กลงอย่างเห็นได้ชัด 289.2 nm (ตารางที่ 4.5) ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ทรายได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การดูดซับของอาร์ซิเนตที่เกิดขึ้นในคอลัมน์เป็นแบบไม่สมดุล (Chotpantararat and Kiatvarangkul, 2018)

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้งที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Hydrus-1D

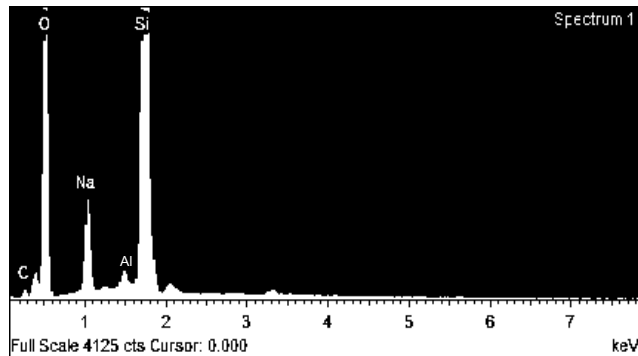
คอลัมน์ ที่	As(V)	Equilibrium model				The two-site model (TSM)					
		K_F	$1/n$	RMSE	R^2	K_F	$1/n$	f	α (hr ⁻¹)	RMSE	R^2
1	As(V) _{Total}	4.363	0.474	1.165	0.9569	4.763	0.360	0.823	0.0052	1.215	0.9518
1*	As(V)	9.810	0.580	-	0.9763	9.50	0.59	0.99	0.0040	-	0.9894
2	As(V) _{Total}	4.094	0.540	1.008	0.9759	4.672	0.415	0.991	0.004	0.989	0.9754
2*	As(V)	5.57	0.41	-	0.9913	7.20	0.370	0.09	0.0038	-	0.9894
3	As(V) _{Total}	3.714	0.552	0.895	0.9754	3.778	0.325	0.829	0.0041	0.508	0.9917

1*, 2* (Chotpantararat and Amasvata, 2020)

4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเม็ดทราย

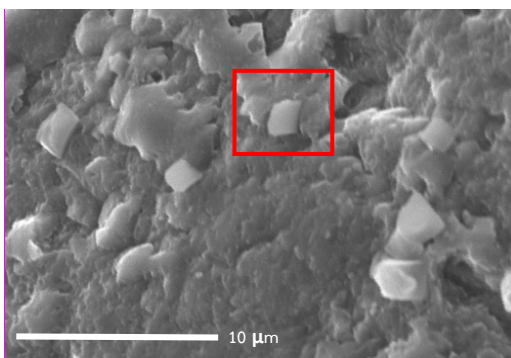


(ก)

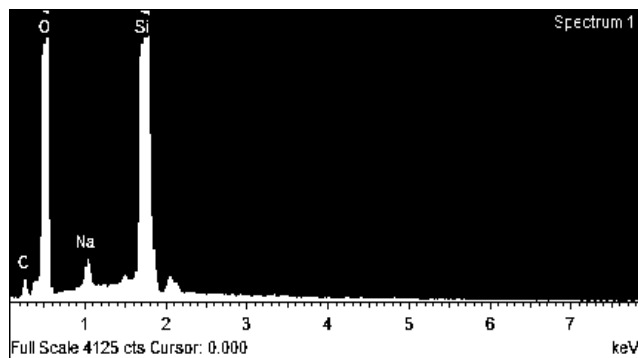


(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) มอนต์มอริลโลไนต์บนพื้นผิวของทราย (ข) สเปกตรัม EDX บนผิวทราย ที่ค่าพีเอช 4

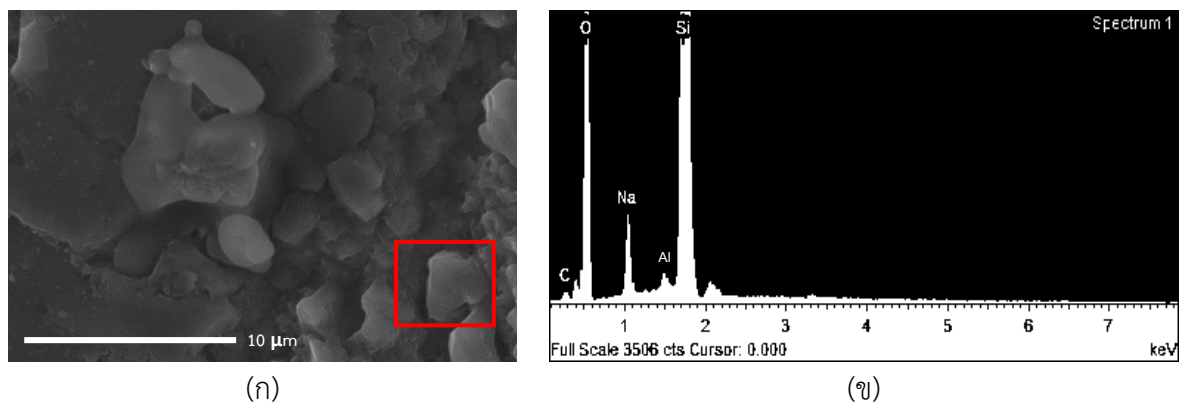


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) มอนต์มอริลโลไนต์บนพื้นผิวของทราย (ข) สเปกตรัม EDX บนผิวทราย ที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ 4.10 (ก) มอนต์มอริลโลไนต์บนพื้นผิวของทราย (ข) สเปกตรัม EDX บนผิวทราย ที่ค่าพีเอช 10

จากการใช้ SEM-EDX เพื่อดูพื้นผิวของเม็ดทรายและระบุงค์ประกอบที่สำคัญ แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของเม็ดทรายมีความขรุขระ ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ คอลลอยด์ได้ นอกจากนี้ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของ EDX ของทรายยังแสดงถึงองค์ประกอบพื้นฐานของผลึกทรายซึ่งก็คือ Si และ O โดยรูปที่ 4.8-4.10 พื้นผิวของทรายจากคอลัมน์หลังจากสารละลายอาร์ซิเนตที่มีมอนต์มอริลโลไนต์อยู่เคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ทรายอิมตัวที่พีเอชเท่ากับ 4 7 และ 10 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์อยู่บนพื้นผิวของทราย โดยผลการวิเคราะห์ EDX เพื่อหาธาตุองค์ประกอบทางเคมี ยืนยันว่ากลุ่มก้อนเหล่านี้เป็นมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ เนื่องจากมีองค์ประกอบของ Si, Al, Na และ O ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์เป็นพาหะ (Facilitator) ในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าพีเอชของสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนตมีผลต่อการเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตผ่านคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ให้เคลื่อนที่เร็วออกมาเร็วขึ้น โดยดูจากค่า Retardation factor ที่ลดลงจาก 4.57 เป็น 2.34 และ 2.29 ที่พีเอช 4 7 และ 10 ตามลำดับ
2. ปริมาณอาร์ซิเนตที่ถูกดูดซับโดยมอนต์มอริลโลไนต์และเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ ขึ้นอยู่กับขนาดและความสามารถในการดูดซับอาร์ซิเนตของมอนต์มอริลโลไนต์ที่พีเอชต่างๆ
3. เมื่อมีผลของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้อาร์ซิเนตเคลื่อนที่ในคอลัมน์ทรายอิมมัตว์ได้เร็วกว่ากรณีที่ปราศจากผลของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารหนูที่พีเอชเท่ากับ 4 และ 7 สูงขึ้นถึงร้อยละ 55.06 และ 61.19 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการวิเคราะห์ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อช่วยในการประเมินปริมาณอาร์ซิเนตที่เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์โดยมอนต์มอริลโลไนต์ ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้วิเคราะห์ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ในแต่ละ Pore volume เนื่องจากอุปกรณ์ชำรุด
2. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอาร์ซิเนตในสิ่งแวดล้อม เช่น อัตราการไหลของน้ำ ค่าความแรงไอออน ปริมาณโลหะ ปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ จุลินทรีย์และอุณหภูมิ
3. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และอาร์ซิเนตที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเท่านั้น อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยนำอนุภาคคอลลอยด์ของกลุ่มแร่ดินอื่นๆที่พบในสิ่งแวดล้อมมาศึกษา หรือการศึกษาผลของโลหะหนักมากกว่า 1 ชนิด ที่สามารถพบรวมกันกับอาร์ซิเนต

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. โครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในน้ำบาดาลในพื้นที่ภาคกลางและตะวันออกเฉียงเหนือ พ.ศ. 2560. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.dgr.go.th/th/download/32>.
[1 มีนาคม 2563]
- ธนินทร์ มีบุปผา และ จตุพล โอภาไพบูลย์. 2555. อิทธิพลของค่า pH และประเภทของวัสดุรองรับพื้นที่ส่งผลต่อการสะสมทางไฟฟ้าแบบรวมของอนุภาคไทเทเนียมบนเนื้อพื้นนิกเกิล.
- ศรัณย์ ต้นตระกูลวงศ์ และ ธวัชชัย แพชมัด. 2556. กลไกและทฤษฎีความคงตัวของยาแขวนตะกอนขนาดนาโนเมตร. วารสารไทยเภสัชศาสตร์และวิทยาการสุขภาพ. 8(1), 36-41.
- Amrhein, C., Mosher, P. A., and Strong, J. E. 1993. Colloidassisted transport of trace metals in roadside soils receiving deicing salts. *Soil Science Society of America Journal*. 57(5), 1212–1217.
- Batchelor, B. 1998. Leach models for contaminants immobilized by pH-dependent mechanisms. *Environmental Science & Technology*. 32(11), 1721-1726.
- Chotpantararat, S., Amasvata, C. 2020. Influences of pH on transport of arsenate (As^{5+}) through different reactive media using column experiments and transport modeling. *Scientific reports*. 10(1), 3512.
- 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, 216–31.
- De Jonge, L. W., Kjaergaard, C., and Moldrup, P. 2004. Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils. *Vadose Zone Journal*. 3(2), 321.
- DeNovio, N.M., Saiers, J.E., and Ryan, J. N. 2004. Colloid movement in unsaturated porous media: Recent advances and future directions. *Vadose Zone Journal*. 3(2), 338–51.
- Duker, A.A., Carranza, E.J.M., Hale, M. 2005. Arsenic geochemistry and health. *Environment International*. 31, 631–641.
- Flora, S.J.S. 2015. *Handbook of Arsenic Toxicology*. Chapter 1. 1-49.
- Frost, R.R., Griffin, R.A. 1977. Effect of pH on adsorption of arsenic and selenium from landfill leachate by clay minerals. *Soil Science Society of America Journal*. 41, 53–57.
- Greenwood, N.N., Earnshaw, A. 1984. *Chemistry of the Elements*. Pergamon Press, Oxford. Chapter 13.

- 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.
- Hu, B., Luo, H. 2010. Adsorption of hexavalent chromium onto montmorillonite modified with hydroxyaluminum and cetyltrimethylammonium bromide. *Applied Surface Science Journal*. 257, 769–775.
- Kim, J. I. 1991. Actinide colloid generation in groundwater. *Radiochem Acta*. 52/53, 71-81.
- Knappenberger, T., Aramrak, S., and Flury, M. 2015. Transport of barrel and spherical shaped colloids in unsaturated porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*. 180, 69–79.
- Kretzschmar, R.M., Borkovec, M., Grolimund, D. and Elimelech, M. 1999. Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport. *Advances in Agronomy*. 66, 121–193.
- Lee, S., 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*. 469-480.
- Liu, Y.X., Zhang, X., Guo, L., Wu, F., Deng, N.S. 2008. Photodegradation of bisphenol a in the montmorillonite KSF suspended solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 47, 7141-7146.
- Mathialagan, T.; Viraraghavan, T. 2002. Adsorption of cadmium from aqueous solutions by perlite. *Journal of Hazardous Materials*. 94, 291–303.
- Mohapatra, D., Mishra, D., Chaudhury, G., and Das, R.P. 2007. Arsenic(V) adsorption mechanism using kaolinite, montmorillonite and illite from aqueous medium. *Journal of Environmental Science and Health*. 42, 463–469.
- 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., Gimenez, D., Bittelli, M., Vaz, C.M.P. and Flury, M. 2001. Multifractal characterization of soil particle-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 65(5), 1361-1367.
- Ren, X., Zhang, Z., Luo, H., Hu, B., Dang, Z., Yang, C., Li, L. 2014. Adsorption of arsenic modified montmorillonite. *Applied Clay Science Journal*. 97-98, 17–23.

- Roth, E. J., Gilbert, B., & Mays, D. C., 2015. Colloid deposit morphology and clogging in porous media: Fundamental insights through investigation of deposit fractal dimension. *Environmental Science and Technology*. 49(20), 12263–12270.
- Ryan, N. J., and 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.
- Šimůnek, J. and van Genuchten, M. T. 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone J.* 7, 782–797.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. 17, 517–568.
- Tang, X.Y., Weisbrod N. 2009. Colloid-facilitated transport of lead in natural discrete fractures. *Environmental Pollution*. 157, 2266–2274.
- Uddin, F. 2018. Montmorillonite: An Introduction to properties and utilization. *Current topics in the utilization of clay in industrial and medical applications*. 6-11.
- 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.

ภาคผนวก

ผลการศึกษากการผลกระทบบของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์ต่อเคลื่อนตัวของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทราย
อิมิตัวที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10

ตารางที่ ก.1 ค่าความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทราย
อิมิตัว pH = 4

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	Conc. Dissolve As(V) (ppm)	Total C/C ₀	Dissolve C/C ₀
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.5	0.028	0.005	0.002	0.000
3	1.5	0.582	0.514	0.048	0.043
5	2.5	6.680	6.160	0.554	0.511
7	3.5	10.680	9.890	0.886	0.821
9	4.5	11.260	11.000	0.934	0.913
11	5.5	11.220	10.800	0.931	0.896
13	6.5	14.140	10.600	1.173	0.880
15	7.5	11.960	10.500	0.992	0.871
17	8.5	13.000	10.500	1.079	0.871
19	9.5	10.080	10.000	0.836	0.830
21	10.5	13.820	10.300	1.147	0.854
23	11.5	13.700	10.500	1.137	0.871
25	12.5	11.300	10.200	0.938	0.846
27	13.5	10.420	10.700	0.865	0.888
29	15.5	11.000	10.500	0.913	0.871
33	17.5	12.900	10.200	1.070	0.846
35	18.5	12.160	10.200	1.009	0.846
37	19.5	11.920	10.400	0.989	0.863
39	20.5	13.560	11.000	1.125	0.913
41	21.5	11.740	10.400	0.974	0.863
43	22.5	4.520	3.970	0.375	0.329
45	23.5	1.220	0.918	0.101	0.076
47	24.5	0.726	0.361	0.060	0.030

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	Conc. Dissolve As(V) (ppm)	Total C/C ₀	Dissolve C/C ₀
49	25.5	0.450	0.264	0.037	0.022
51	26.5	0.250	0.212	0.021	0.018
53	27.5	0.224	0.199	0.019	0.017
55	28.5	0.328	0.358	0.027	0.030

ตารางที่ ก.2 ค่าความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทราย
อิมิตัว pH = 7

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	Conc. Dissolve As(V) (ppm)	Total C/C ₀	Dissolve C/C ₀
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.5	0.002	0.002	0.000	0.000
3	1.5	0.001	0.001	0.000	0.000
4	2	1.516	1.624	0.119	0.163
5	2.5	10.224	7.267	0.803	0.729
6	3	11.033	7.524	0.866	0.755
7	3.5	13.556	10.682	1.064	1.071
9	4.5	12.235	9.071	0.960	0.910
11	5.5	13.736	9.741	1.078	0.977
13	6.6	12.444	10.476	0.977	1.051
15	7.5	12.992	9.777	1.020	0.981
17	8.5	13.231	9.667	1.039	0.970
19	9.5	12.992	10.351	1.020	1.038
21	10.5	12.734	9.741	0.999	0.977
23	11.5	13.458	10.388	1.056	1.042
25	12.5	12.158	9.904	0.954	0.993
27	13.5	13.290	9.849	1.043	0.988
29	14.5	13.439	10.247	1.054	1.028
31	15.5	12.213	9.534	0.959	0.956

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	Conc. Dissolve As(V) (ppm)	Total C/C ₀	Dissolve C/C ₀
33	16.5	12.737	9.575	1.000	0.960
35	17.5	10.767	10.844	0.845	1.088
37	18.5	11.978	10.280	0.940	1.031
39	19.5	12.565	9.673	0.986	0.970
41	20.5	10.411	9.910	0.817	0.994
43	21.5	0.575	9.751	0.045	0.978
45	22.5	0.137	1.175	0.011	0.118
47	23.5	0.072	0.092	0.005	0.009
49	24.5	0.048	0.071	0.004	0.007
51	25.5	0.050	0.058	0.004	0.006
53	26.5	0.075	0.046	0.006	0.005
55	27.5	0.040	0.037	0.003	0.004
57	28.5	0.032	0.029	0.003	0.003

ตารางที่ ก.3 ค่าความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์คอลลอยด์และความเข้มข้นของอาร์ซิเนตในคอลัมน์ทราย
อิ่มตัว pH = 10

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	Conc. Dissolve As(V) (ppm)	Total C/C ₀	Dissolve C/C ₀
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.5	0.016	0.011	0.000	0.001
3	1.5	0.326	0.227	0.030	0.021
5	2.5	8.720	8.300	0.810	0.774
7	3.5	10.660	10.100	0.990	0.942
9	4.5	10.380	10.400	0.970	0.970
11	5.5	10.420	11.200	0.970	1.045
13	6.5	10.660	10.600	0.990	0.989
15	7.5	10.540	10.400	0.980	0.970
17	8.5	10.520	10.500	0.980	0.980

หมายเลข ตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	Conc. Dissolve As(V) (ppm)	Total C/C ₀	Dissolve C/C ₀
19	9.5	10.460	10.600	0.980	0.989
21	10.5	10.680	10.200	1.000	0.952
23	11.5	10.540	11.200	0.980	1.045
25	12.5	10.640	10.600	0.990	0.989
27	13.5	10.480	10.400	0.980	0.970
29	15.5	11.240	10.200	1.050	0.951
33	17.5	11.820	10.700	1.100	0.998
37	19.5	11.200	9.930	1.050	0.926
39	20.5	10.680	11.00	1.000	1.026
41	21.5	10.560	10.700	0.990	0.998
43	22.5	3.440	3.360	0.320	0.314
45	23.5	0.666	0.684	0.060	0.064
47	24.5	0.097	0.092	0.010	0.009
49	25.5	0.055	0.047	0.010	0.004
51	26.5	0.048	0.036	0.000	0.003
53	27.5	0.064	0.031	0.010	0.003
55	28.5	0.081	0.027	0.010	0.002

ตารางที่ ข.1 ค่าความเข้มข้นของอาร์ซีเนตทั้งหมดของคอลัมน์ pH=4 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
0	0	0.000	0.000	0.000
1	0.5	0.028	0.000	0.000
3	1.5	0.582	0.000	0.000
5	2.5	6.680	7.205	9.613
7	3.5	10.680	11.886	11.652
9	4.5	11.260	12.041	11.767
11	5.5	11.220	12.050	11.811

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
13	6.5	14.140	12.050	11.846
15	7.5	11.960	12.050	11.876
17	8.5	13.000	12.050	11.901
19	9.5	10.080	12.050	11.922
21	10.5	13.820	12.050	11.941
23	11.5	13.700	12.050	11.957
25	12.5	11.300	12.050	11.970
27	13.5	10.420	12.050	11.982
29	15.5	11.000	12.050	12.000
33	17.5	12.900	12.050	12.014
35	18.5	12.160	12.050	12.019
37	19.5	11.920	12.050	12.024
39	20.5	13.560	12.050	12.028
41	21.5	11.740	12.050	12.031
43	22.5	4.520	6.974	6.210
45	23.5	1.220	2.747	2.206
47	24.5	0.726	1.491	1.184
49	25.5	0.450	0.963	0.785
51	26.5	0.250	0.685	0.583
53	27.5	0.224	0.519	0.463
55	28.5	0.328	0.410	0.383

ตารางที่ ข.3 ค่าความเข้มข้นของอาร์ซิเนตทั้งหมดของคอลัมน์ pH=7 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
0	0	0.000	0.000	0.000
1	0.5	0.002	0.000	0.000
3	1.5	0.001	0.000	0.000
5	2.5	10.224	10.425	9.731

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
7	3.5	13.556	12.602	12.604
9	4.5	12.235	12.730	12.720
11	5.5	13.736	12.740	12.728
13	6.6	12.444	12.740	12.730
15	7.5	12.992	12.740	12.731
17	8.5	13.231	12.740	12.732
19	9.5	12.992	12.740	12.733
21	10.5	12.734	12.740	12.734
23	11.5	13.458	12.740	12.735
25	12.5	12.158	12.740	12.735
27	13.5	13.290	12.740	12.736
29	14.5	13.439	12.740	12.736
31	15.5	12.213	12.740	12.737
33	16.5	12.737	12.740	12.738
35	17.5	10.767	12.740	12.738
37	18.5	11.978	12.740	12.738
39	19.5	12.565	12.740	12.738
41	20.5	10.411	8.333	7.353
43	21.5	0.575	3.587	2.835
45	22.5	0.137	1.979	1.521
47	23.5	0.072	1.270	0.979
49	24.5	0.048	0.883	0.697
51	25.5	0.050	0.624	0.530
53	26.5	0.075	0.407	0.420
55	27.5	0.040	0.169	0.344
57	28.5	0.032	-0.006	0.289

ตารางที่ ข.5 ค่าความเข้มข้นของอาร์ซีเนตทั้งหมดของคอลัมน์ pH=10 ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS-1D

หมายเลขตัวอย่าง	Pore volume	Conc. Total As(V) (ppm)	EQ-fit	Non EQ-fit
0	0	0.000	0.000	0.000
1	0.5	0.016	0.000	0.000
3	1.5	0.326	0.000	0.000
5	2.5	8.720	9.860	8.864
7	3.5	10.660	10.673	10.476
9	4.5	10.380	10.717	10.546
11	5.5	10.420	10.720	10.568
13	6.5	10.660	10.720	10.586
15	7.5	10.540	10.720	10.601
17	8.5	10.520	10.720	10.615
19	9.5	10.460	10.720	10.627
21	10.5	10.680	10.720	10.638
23	11.5	10.540	10.720	10.647
25	12.5	10.640	10.720	10.656
27	13.5	10.480	10.720	10.663
29	15.5	11.240	10.720	10.676
33	17.5	11.820	10.720	10.685
37	19.5	11.200	10.720	10.693
39	20.5	10.680	10.720	10.696
41	21.5	10.560	10.720	10.699
43	22.5	3.440	6.480	4.989
45	23.5	0.666	2.666	1.605
47	24.5	0.097	1.463	0.826
49	25.5	0.055	0.937	0.536
51	26.5	0.048	0.644	0.393
53	27.5	0.064	0.433	0.309
55	28.5	0.081	0.297	0.255

