

การบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนิตโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดร่วมกับเฟอร์ริกคลอไรด์



นางสาววิศรา ตันติวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Treatment of arsenate contaminated soil using rhamnolipids bio-  
surfactant with ferric chloride



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



วริศรา ตันติวงศ์ : การบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนเตดโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์ (Treatment of arsenate contaminated soil using rhamnolipids bio-surfactant with ferric chloride) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สุธา ขาวเจียร, 143 หน้า.

ดินปนเปื้อนอาร์เซนเตดเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพประชาชนและความมั่นคงของระบบนิเวศ การบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนเตดจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดอาร์เซนเตดออกจากดินปนเปื้อนสังเคราะห์ด้วยวิธีการล้างดิน โดยใช้สารล้างดินที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 11 จำนวน 4 ประเภท ประกอบด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิด และสารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ดินที่ทำการศึกษาคือดินเกรตดิเคอเรท 2 ชนิด คือ ดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกา ซึ่งดินทั้ง 2 ชนิด ไม่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบและมีประจุที่ผิวดินเป็นประจุลบ โดยดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาสามารถดูดซับอาร์เซนเตดได้ 80.10 และ 29.16 มิลลิกรัมอาร์เซนเตดต่อกิโลกรัมดินตามลำดับ การดูดซับอาร์เซนเตดและสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดของดินเหนียวเคโอลิไนท์เป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชไอโซเทอมและมีความเร็วในการดูดซับเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนส่วนการดูดซับอาร์เซนเตดและสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดของดินทรายซิลิกาเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชไอโซเทอมและแลงเมียร์ไอโซเทอมตามลำดับ และมีความเร็วในการดูดซับเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดออกจากดินปนเปื้อน พบว่า กรณีดินเหนียวเคโอลิไนท์ สารละลายแรมโนลิพิดให้ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดได้ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 63.36 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 20 ชั่วโมง ตามมาด้วยสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ น้ำกลั่น และสารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดเท่ากับ 59.72 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 20 ชั่วโมง และ 54.47 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 24 ชั่วโมง และ 32.56 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 16 ชั่วโมงตามลำดับ และกรณีของดินทรายซิลิกา สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดได้ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 96.63 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 4 ชั่วโมง ตามมาด้วยสารละลายแรมโนลิพิด สารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ และน้ำกลั่น ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดเท่ากับ 86.14 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 4 ชั่วโมง และ 75.18 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 8 ชั่วโมง และ 29.54 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 24 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้แม้ว่าการใช้สารละลายแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์แยกกันจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตดได้ดีกว่า แต่ผลการทดลองยังพบว่าการใช้สารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์มีแนวโน้มที่ดีในการป้องกันไม่ให้เกิดการดูดซับอาร์เซนเตดซ้ำบนผิวดิน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5870239321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: RHAMNOLIPID BIOSURFACTANT / FERRIC CHLORIDE / SOIL REMEDIATION / SOIL WASHING / KAOLINITE / SILICA SAND

WARISARA TANTIWONG: Treatment of arsenate contaminated soil using rhamnolipids bio-surfactant with ferric chloride. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 143 pp.

Soil containing high contents of arsenate can be harmful to human from their contribute into the food chain. This research studied arsenate contaminated soil treatment based on 4 types of washing agent (pH 11) including distilled water, ferric chloride, rhamnolipids and rhamnolipids with ferric chloride. Two types of soil were used as simulated soil including kaolinite and silica sand. The soils were defined not contain organic and both of its had negative charges on its soil surface. Arsenate and rhamnolipids adsorption on kaolinite were fitted to Freundlich isotherm and pseudo-second order kinetic. In the case of silica sand, Arsenate and rhamnolipids adsorption were fitted to Freundlich isotherm, Langmuir isotherm and pseudo-second order kinetic, respectively.

For observed an amount of arsenate contamination, kaolinite and silica sand adsorbed arsenate 80.10 mg.As/kg.soil and 29.16 mg.As/kg.soil, respectively. Regarding kaolinite, the best condition was observed when using rhamnolipids, followed by ferric chloride, distilled water and rhamnolipids with ferric chloride with removal efficiency of 63.36% at 20 hrs washing time, 59.72% at 20 hrs washing time, 54.47% at 24 hrs washing time and 32.56% at 16 hrs washing time. In the case of silica sand, the best washing agent was ferric chloride, followed by rhamnolipids, rhamnolipids with ferric chloride and distilled water, with removal efficiency of 96.63% at 4 hrs washing time, 86.14% at 4 hrs washing time, 75.18% at 8 hrs washing time and 29.54% at 24 hrs washing time. The treatment of arsenate contaminated soil by rhamnolipids and ferric chloride separately was proven to be efficient. In addition, even using rhamnolipids and ferric chloride separately had better efficiency than its mixture but the result reveals the good prospect to apply rhamnolipid with ferric chloride for preventing arsenic re-adsorption onto the soil.

Department: Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์ขององค์กรต่างๆ และบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ ๗๒ พรรษา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาแลกเปลี่ยนและการทำวิจัย ณ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น เพื่อเข้าร่วมโครงการ Urban Environment and Health in Asia (UEHAS) จากองค์การสนับสนุนนักศึกษาแห่งประเทศไทย ญี่ปุ่น หรือ Japan Student Services Organization (JASSO)

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเอียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ให้การสนับสนุนและคำแนะนำต่างๆ รวมถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาในการทำงานวิจัย ตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ์ และ อาจารย์ ดร.ชตชนก อัทธพงศ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ทั้งยังให้ความรู้และคำแนะนำ รวมถึงแนวทางการแก้ไขเพื่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นากาจิมะ ฟูมิยุกิ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โทบิโนะ โทโมะฮิโระ อาจารย์ที่ปรึกษาขณะผู้วิจัยเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยน ณ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น รวมทั้งขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร. ซาโตชิ ทากิซาวะ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐิภาณ ปัญญาพลกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนยุกต์ โลหวิชรินทร์ ที่ให้การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ส่งเสริมการทำวิจัย และสนับสนุนผู้วิจัยในการเข้าร่วมโครงการ Urban Environment and Health in Asia (UEHAS)

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในรายวิชาต่างๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกๆ ท่าน ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกด้านงานเอกสารในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณ คุณรามนรี เนตรวิเชียร ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในระหว่างการดำเนินการทดลอง พร้อมทั้งช่วยอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์และสารเคมีในงานวิจัยนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ .....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	4
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	4
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.1 อาร์เซนิก (Arsenic).....	8
2.1.1 สมบัติทั่วไปของอาร์เซนิก.....	11
2.1.2 ผลกระทบของอาร์เซนิกต่อสุขภาพ.....	12
2.2 สารล้างดิน (Washing Agent).....	13
2.2.1 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	13
2.2.2 สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด (Rhamnolipids Surfactant).....	14
2.2.3 เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride).....	15
2.3 การบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนัก .....	16
2.3.1 การบำบัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิว.....	19

2.4 สมบัติของดินสังเคราะห์ .....	22
2.4.1 สมบัติทั่วไปของเคโอลิไนท์ (Kaolinite).....	23
2.4.2 สมบัติทั่วไปของทรายซิลิกา (Silica Sand).....	23
2.4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity).....	23
2.4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Specific Surface and Pore Volume) ....	24
2.4.5 ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter Content).....	25
2.4.6 จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge) .....	26
2.4.7 พีเอช (pH).....	27
2.4.8 การดูดซับบนพื้นผิวดิน (Adsorption) .....	27
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32
2.6 สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	38
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 แผนการทดลอง .....	40
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี .....	42
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	42
3.2.2 สารเคมี.....	43
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	45
3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 : ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง.....	45
1) การเตรียมดินทดลองเบื้องต้น.....	45
2) การศึกษาการดูดซับของอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง .....	46
2.1) ไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง .....	46
2.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง .....	48
3) การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่าง .....	51



3.1) ค่าความถ่วงจำเพาะ.....	51
3.2) จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ .....	53
3.3) พื้นที่ผิวจำเพาะ.....	54
3.4) ปริมาณสารอินทรีย์.....	55
3.5) พีเอช .....	56
3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 : ขั้นตอนการศึกษาสารล้า่งดิน .....	57
1) การศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง .....	58
1.1) ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง .....	58
1.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง .....	60
2) การศึกษาการตกตะกอนของสารล้า่งดิน.....	62
3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3 : ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตออกจากดินปนเปื้อน.....	63
1) การเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนเต.....	64
2) การเตรียมสารล้า่งดิน .....	65
3) การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตออกจากดินปนเปื้อน .....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	68
4.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1: ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง.....	68
1) ผลการเตรียมดินทดลองเบื้องต้น.....	68
2) ผลการศึกษาการดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง .....	69
2.1) ไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง .....	69
2.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง .....	72
3) ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่าง.....	75
3.1) ค่าความถ่วงจำเพาะ .....	75

3.2) จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์.....	75
3.3) พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูปทรง.....	77
3.4) ปริมาณสารอินทรีย์.....	77
3.5) พีเอช.....	78
4.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2: ขั้นตอนการศึกษาสารล้างดิน.....	78
1) ผลการศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง.....	78
1.1) ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง.....	78
1.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง.....	82
2) ผลการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน.....	85
4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3: ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตออกจากดินปนเปื้อน.....	91
1) ผลการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนเต.....	91
2) ผลการเตรียมสารล้างดิน.....	91
3) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตออกจากดินปนเปื้อน.....	92
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	99
5.1 สรุปผลวิจัย.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	101
รายการอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง.....	109
ภาคผนวก ข การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง.....	114
ภาคผนวก ค การศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของดินตัวอย่าง.....	120

ภาคผนวก ง การศึกษาค่าจุดที่ประจวบเป็นศูนย์.....	124
ภาคผนวก จ การศึกษาปริมาณสารอินทรีย์.....	127
ภาคผนวก ฉ การศึกษาไอโซโทมการดูดซับแรมโนลิพิตบนดินตัวอย่าง .....	130
ภาคผนวก ช การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิตบนดินตัวอย่าง.....	135
ภาคผนวก ซ การประเมินราคาค่าบำบัด.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	143



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณอาร์เซนิกในดินของประเทศต่างๆ .....	9
ตารางที่ 2 ปริมาณอาร์เซนิกปนเปื้อนในดินและทางแร่ในพื้นที่ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช และ อ.บันนังสตา จ.ยะลา.....	10
ตารางที่ 3 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินประเภทต่างๆ .....	24
ตารางที่ 4 ค่าจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินประเภทต่างๆ .....	26
ตารางที่ 5 ค่าพีเอชดินและระดับความเป็นกรด-เบสของดิน .....	27
ตารางที่ 6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัย .....	41
ตารางที่ 7 สูตรเคมีและมวลโมเลกุลของสารหลักที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย .....	44
ตารางที่ 8 ปริมาณดินที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดิน.....	51
ตารางที่ 9 ค่าคงที่ของอนุกรมที่ทำการทดสอบ (K) ที่อนุกรมต่างๆ .....	53
ตารางที่ 10 สรุปสมการไอโซเทอมและค่าคงที่การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง.....	71
ตารางที่ 11 สรุปสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง.....	74
ตารางที่ 12 ผลการทดลองพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของดินตัวอย่าง .....	77
ตารางที่ 13 สรุปสมการไอโซเทอมและค่าคงที่การดูดซับแรมโนลิพิคบนดินตัวอย่าง .....	81
ตารางที่ 14 สรุปสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิคบนดินตัวอย่าง.....	84
ตารางที่ 15 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร.....	87
ตารางที่ 16 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร.....	89
ตารางที่ 17 ผลการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนด.....	91
ตารางที่ 18 ผลการกำจัดอาร์เซนออกจากดินตัวอย่างด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ประเภท .....	92
ตารางที่ 19 ปริมาณอาร์เซนดที่คงเหลือในดินหลังการล้างดินเทียบกับมาตรฐานคุณภาพดินของกรม ควบคุมมลพิษ .....	93

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ภาพตัดตามยาวแสดงประเภทดินบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนอาร์เซนิก ในพื้นที่ อ.ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช.....	11
ภาพที่ 2 โครงสร้างอะตอมและโครงสร้างผลึกของอาร์เซนิก.....	11
ภาพที่ 3 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	13
ภาพที่ 4 โครงสร้างเคมีของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด R1 และ R2.....	14
ภาพที่ 5 กราฟแสดงการละลายของเฟอริกไฮดรอกไซด์ในน้ำบริสุทธิ์.....	16
ภาพที่ 6 การบำบัดดินโดยวิธีล้างดิน (Soil Washing).....	20
ภาพที่ 7 การบำบัดดินโดยวิธีชะดิน (Soil Flushing).....	20
ภาพที่ 8 ค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration: CMC).....	21
ภาพที่ 9 กลไกการกำจัดอาร์เซนิกด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด.....	22
ภาพที่ 10 การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด R1 บนดินชนิดต่างๆ.....	33
ภาพที่ 11 แผนการดำเนินการทดลอง.....	41
ภาพที่ 12 แผนผังการศึกษาดินตัวอย่าง.....	45
ภาพที่ 13 แผนภาพการเตรียมดินทดลองเบื้องต้น.....	46
ภาพที่ 14 แผนภาพการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิตบนดินตัวอย่าง.....	48
ภาพที่ 15 แผนภาพการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนิตบนดินตัวอย่าง.....	50
ภาพที่ 16 เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน.....	54
ภาพที่ 17 แผนภาพการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ของดินตัวอย่าง.....	56
ภาพที่ 18 แผนภาพการศึกษาค่าพีเอชของดินตัวอย่าง.....	57
ภาพที่ 19 แผนผังการศึกษาสารล้างดิน.....	57
ภาพที่ 20 แผนภาพการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่าง.....	59
ภาพที่ 21 แผนภาพการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่าง.....	61

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 22 แผนภาพการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน.....	63
ภาพที่ 23 แผนภาพการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน.....	64
ภาพที่ 24 แผนภาพการเตรียมสารล้างดิน.....	65
ภาพที่ 25 แผนภาพแสดงขั้นตอนการล้างดิน .....	67
ภาพที่ 26 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนตบนดินตัวอย่าง.....	70
ภาพที่ 27 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอาร์เซนตบนดินตัวอย่าง.....	73
ภาพที่ 28 ผลการศึกษาจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินตัวอย่าง.....	76
ภาพที่ 29 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิตบนดินตัวอย่าง .....	80
ภาพที่ 30 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแรมโนลิพิตบนดินตัวอย่าง.....	83
ภาพที่ 31 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร.....	88
ภาพที่ 32 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร.....	90
ภาพที่ 33 ผลการศึกษาปริมาณอาร์เซนตที่ถูกกำจัดของสารล้างดินแต่ละชนิด.....	94
ภาพที่ 34 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตของสารล้างดินแต่ละชนิด.....	95

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปนเปื้อนในดินนับเป็นปัญหาในหลายประเทศทั่วโลก ซึ่งก่อให้เกิดการทำลายสมดุลของระบบนิเวศและเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเศรษฐกิจและสุขภาพประชาชน การปนเปื้อนในดินเกิดจากการปล่อยปะละเลยและการจัดการอย่างไม่เหมาะสมจากการประกอบกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การปล่อยทิ้งของเสียจากอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ การทำเกษตรกรรม เป็นต้น

อาร์เซนิกปนเปื้อนในดินเป็นหนึ่งในปัญหาดินปนเปื้อนที่ถูกรายงานไปทั่วโลก เช่น เชโกสโลวาเกีย แคนาดา กรีซ สก๊อตแลนด์ และบัลแกเรีย (Mandal และ Suzuki, 2002) ซึ่งสาเหตุการปนเปื้อนเกิดขึ้นทั้งจากธรรมชาติและอุตสาหกรรม ในประเทศไทยพบการปนเปื้อนอาร์เซนิกในดินซึ่งมีสาเหตุจากอุตสาหกรรมถลุงแร่ เช่น เหมืองแร่ดีบุกและเหมืองแร่ทองคำ ในเขตพื้นที่ ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช และเหมืองแร่ดีบุกในเขตพื้นที่ อ.บันนังสตา จ.ยะลา (Visoottiviseth, Francecesconi และ Sridokchan, 2001) ซึ่งดินในพื้นที่ดังกล่าวมีปริมาณอาร์เซนิกสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งกำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งกำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547: ออนไลน์) อาร์เซนิกเป็นสารปนเปื้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพ หากได้รับอาร์เซนิก 1 – 5 มิลลิกรัมต่อวันอย่างต่อเนื่องจะมีอาการปรากฏทางผิวหนังเป็นผื่นแดง คันและสีผิวเปลี่ยนเป็นสีดำคล้ำ เนื่องจากเม็ดสีที่ผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีดำและในกรณีที่ได้รับเป็นระยะเวลานานก็สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนังได้ (พรพรรณ บวรสาโชติ, 2538)

เนื่องจากความเสี่ยงต่อสุขภาพประชาชนและความมั่นคงของระบบนิเวศ การบำบัดดินปนเปื้อนจึงเป็นเรื่องจำเป็น เทคโนโลยีในการบำบัดดินปนเปื้อนถูกพัฒนาขึ้นอย่างหลากหลาย ทั้งการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางชีวภาพและการบำบัดทางเคมี การใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารล้างดินเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนที่ใช้เวลาน้อยและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถดำเนินการบำบัดทั้งในพื้นที่ปนเปื้อน (In-situ) และการบำบัดนอกพื้นที่ปนเปื้อน (Ex-situ)

สารลดแรงตึงผิวถูกใช้เป็นสารล้างดินเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออกจากดิน เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นสารในกลุ่มแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic) ที่มีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนหัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ด้วยโครงสร้างดังกล่าวทำให้สารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายแก่สารปนเปื้อน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (Rhamnolipids) ร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์ เพื่อกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อนอาร์เซนต ซึ่งดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินสังเคราะห์ 2 ประเภท คือ ดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์ (Kaolinite) และดินทรายประเภททรายซิลิกา (Silica sand) โดยศึกษาสมบัติพื้นฐานของดินที่ใช้ในการทดลองได้แก่ การศึกษาการดูดซับอาร์เซนตบนดิน ตัวอย่าง การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนตบนดินตัวอย่าง รวมทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่างซึ่งประกอบด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะ จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณสารอินทรีย์และค่าพีเอช ดินตัวอย่างถูกทำให้ปนเปื้อนอาร์เซนตโดยใช้สารละลายโซเดียมอาร์เซนต-ไดเบสิก เฮปตาไฮเดรต (Sodium arsenate dibasic heptahydrate) ผสมกับดินตัวอย่างแต่ละประเภทที่อัตราส่วน 1:1 น้ำหนักดินต่อปริมาตรสารละลาย ในส่วนของสารล้างดินใช้สารล้างดิน 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิด และสารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด ถูกปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าเท่ากับ 11 นอกจากนี้ยังศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่าง ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่างและศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน โดยนำดินตัวอย่างปนเปื้อนอาร์เซนตทั้งดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกามาล้างด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 25 น้ำหนักดินต่อสารละลาย และนำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลารวม 24 ชั่วโมง พร้อมเก็บตัวอย่างทุก 4 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการกำจัดอาร์เซนตของสารล้างดินแต่ละชนิดตามเวลาที่ใช้ในการล้างดินต่างๆ กัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตที่ปนเปื้อนดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์และดินทรายประเภททรายซิลิกา โดยใช้วิธีการล้างดินด้วยสารล้างดินซึ่งประกอบไปด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิด และสารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์

1.2.2 เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดบนดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์และดินทรายประเภททรายซิลิกา

1.2.3 เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับของอาร์เซนตบนดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์และดินทรายประเภททรายซิลิกา

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของเวลาล้างดินต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตที่ปนเปื้อนในดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์และดินทรายประเภททรายซิลิกา โดยใช้สารล้างดินซึ่งประกอบไปด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิด และสารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์



### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

สารละลายแรมโนลิพิดสามารถใช้เป็นสารล้างดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตในดินปนเปื้อนอาร์เซนเตได้ ถึงแม้ว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบและอาร์เซนิกซึ่งเป็นสารกึ่งโลหะก็มีประจุลบเช่นกัน แต่ประจุลบของแรมโนลิพิดนี้อาจสามารถแทนที่ประจุลบของอาร์เซนเตที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดิน นอกจากนี้แรมโนลิพิดยังสามารถลดแรงตึงผิวระหว่างดินและอาร์เซนเตทำให้อาร์เซนเตดูดซับที่ผิวดินลดน้อยลง ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเหล็ก (Wang และ Mulligan, 2008) ซึ่งสารล้างดินที่ประกอบไปด้วยแรมโนลิพิดและเพอร์ริกอาจช่วยให้เกิดการรวมตัวระหว่างแรมโนลิพิด เพอร์ริก และอาร์เซนิก ในลักษณะของสะพานเชื่อมโลหะ (Metal bridging mechanism) และทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตจากดินปนเปื้อนดีขึ้น

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการซึ่งดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิตั้ง ๓ องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการชั้น 3 ตึก 14 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย โดยกำหนดขอบเขตงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

1.4.1 ดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินสังเคราะห์ 2 ประเภท คือ ดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์และดินทรายประเภททรายซิลิกา โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่างประกอบด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะ จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณสารอินทรีย์ และค่าพีเอช

1.4.2 สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ศึกษาคือสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท เอจีเออี เทคโนโลยี (AGAE Technologies, LLC) ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้ชื่อการค้า AGAE R90 มีองค์ประกอบของ R1 ต่อ R2 ที่ 3:2 โดยมวล และมีความบริสุทธิ์ของสารร้อยละ 90

1.4.3 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่างโดยใช้สารละลายโซเดียมอาร์เซนเต-ไดเบสิก เฮปตาไฮเดรต (Sodium arsenate dibasic heptahydrate) ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนเตต่างๆ กัน 7 ความเข้มข้น ดังนี้ 0, 5, 10, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของอาร์เซนเตบนดินตัวอย่างโดยใช้สารละลายโซเดียมอาร์เซนเต-ไดเบสิก เฮปตาไฮเดรต (Sodium arsenate dibasic heptahydrate) ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนเต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.5 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน 9 ความเข้มข้น ดังนี้ 0, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00, 2.50, 5.00, 7.50 และ 10.00 มิลลิโมลต่อลิตร

1.4.6 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่างที่ความเข้มข้นของแรมโนลิพิท 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร

1.4.7 ศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดินเพื่อสังเกตผลของค่าพีเอชต่อการตกตะกอนของสารละลายแรมโนลิพิท สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ รวมถึงการตกตะกอนร่วมของสารละลายแรมโนลิพิทและเพอร์ริกคลอไรด์ โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร และความเข้มข้น 10.0 มิลลิโมลต่อลิตร

1.4.8 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน โดยทำให้ดินตัวอย่างปนเปื้อนอาร์เซนตโดยใช้สารละลายโซเดียมอาร์เซนต-ไดเบสิก เฮปตาไฮเดรต (Sodium arsenate dibasic heptahydrate) ผสมกับดินตัวอย่างแต่ละประเภทที่อัตราส่วน 1:1 น้ำหนักดินต่อสารละลาย ผสมด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 4 วัน แล้วแยกส่วนสารละลายออกจากนั้นนำดินตัวอย่างปนเปื้อนอาร์เซนตทั้งเคโอลิไนท์และทรายซิลิกามาล้างด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิดซึ่งประกอบไปด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิท และสารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งถูกปรับให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 25 น้ำหนักดินต่อสารละลาย จากนั้นนำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลารวม 24 ชั่วโมง พร้อมเก็บตัวอย่างสารล้างดินแต่ละประเภททุก 4 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมงเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการกำจัดอาร์เซนตของสารล้างดินแต่ละชนิดตามเวลาที่ใช้ในการล้างดินต่างๆ กัน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้แนวทางในการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวภาพผิวแรมโนลิพิทร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์เพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนตที่มีองค์ประกอบหลักของดินเป็นเคโอลิไนท์หรือทรายซิลิกา

1.5.2 ได้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนตที่มีองค์ประกอบหลักของดินเป็นเคโอลิไนท์หรือทรายซิลิกา ด้วยสารล้างดินที่ประกอบไปด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิท และสารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อาร์เซนิก (Arsenic)

อาร์เซนิกหรือสารหนูเป็นธาตุที่พบได้มากที่สุดเป็นอันดับที่ 20 ของโลกและเป็นองค์ประกอบของแร่ต่างๆ มากกว่า 245 ชนิด โดยมักพบเป็นแร่ผสมกับซิลไฟด์ สังกะสี นิกเกิล ตะกั่ว โคบอลต์ หรือโลหะอื่นๆ ในภาพของอาร์เซนิตประมาณร้อยละ 60 ซิลไฟด์หรือซิลโฟซอลต์ ร้อยละ 20 และอาร์เซไนต์ อาร์เซไนท์ ซิลิเกต ออกไซด์ และธาตุอาร์เซนิก อีกร้อยละ 20 โดยอาร์เซนิกที่พบบนพื้นผิวโลกมีค่าประมาณ 1.5 – 3.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบประมาณ 0.5 – 2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่หินอาร์จีลาเซียสเนื้อละเอียดและหินฟอสเฟอไรต์มีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบถึง 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Mandal และ Suzuki, 2002) นอกจากนี้อาร์เซนิกยังสามารถตกตะกอนร่วมกับเหล็กไฮดรอกไซด์และซิลไฟด์เป็นหินตะกอนได้อีกด้วย การกระจายตัวของอาร์เซนิกโดยธรรมชาติเกิดจากแร่หรือหินที่มีองค์ประกอบของอาร์เซนิกผุกร่อนเป็นฝุ่นผงและจากสภาพอากาศซึ่งทำให้อาร์เซนิกซิลไฟด์เปลี่ยนแปลงเป็นอาร์เซนิกไฮดรอกไซด์และเข้าสู่วัฏจักรอาร์เซนิกในภาพที่เป็นของแข็งหรือละลายน้ำจากการสัมผัสกับน้ำ เช่น น้ำฝน น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน เป็นต้น ด้วยกลไกเหล่านี้ทำให้การปนเปื้อนอาร์เซนิกแพร่กระจายไปยังพืชและสัตว์และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ในที่สุด ซึ่งมนุษย์สามารถรับอาร์เซนิกเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งจากการหายใจหรือรับประทานอาหารและน้ำที่มีการปนเปื้อนอาร์เซนิก อาร์เซนิกนับเป็นสารพิษที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพแม้ว่าจะได้รับในปริมาณน้อย อีกทั้งยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

อาร์เซนิกในดินตามธรรมชาติจะมีปริมาณมากกว่าในหิน โดยดินส่วนมากมีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบประมาณ 1 – 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณอาร์เซนิกที่พบในดินคือประเภทของหินต้นกำเนิดและกิจกรรมของมนุษย์ในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งดินประเภทดินทรายมักพบอาร์เซนิกที่ความเข้มข้นต่ำ ส่วนดินตะกอนพัดพา (Alluvial) และดินที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบมักพบอาร์เซนิกที่ความเข้มข้นสูง ปริมาณอาร์เซนิกในดินของประเทศต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

สาเหตุที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนอาร์เซนิกในดินเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ในอดีตช่วงปี ค.ศ.1970 อาร์เซนิกเคยถูกใช้ในการเกษตรมากกว่าร้อยละ 80 ของอาร์เซนิกที่ผลิตทั้งหมด โดยมีแหล่งผลิตจากประเทศจีน สหภาพโซเวียต ฝรั่งเศส เม็กซิโก เยอรมัน เปรู นามิเบีย สวีเดน และสหรัฐอเมริกา การใช้อาร์เซนิกเพื่อการเกษตรประกอบด้วยการใช้เป็นยาฆ่าแมลงและยากำจัดศัตรูพืช นอกจากนี้อาร์เซนิกยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้กรดอาร์เซนิกเป็นสารดูดความชื้นในอุตสาหกรรมคอตตอน อีกทั้งอุตสาหกรรมยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของอาร์เซนิกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอุตสาหกรรม

เหมืองแร่ทองคำ เนื่องจากสายแร่ทองคำส่วนใหญ่มีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบในภาพของแร่อาร์ซิโนไฟไรต์ ประมาณร้อยละ 46 (กรมทรัพยากรธรณี, 2559ก: ออนไลน์)

สาเหตุที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนอาร์เซนิกในดินอื่นๆ นอกเหนือจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและปริมาณองค์ประกอบสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดิน เป็นต้น อาร์เซนิกที่พบในดินมีทั้งภาพสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยส่วนมากพบในภาพของสารอนินทรีย์ แต่ก็พบอาร์เซนิกในภาพสารประกอบกับสารอินทรีย์ในดินได้เช่นกัน ในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนจะพบอาร์เซนิกในภาพที่มีความเสถียรคืออาร์เซนเตต (As(v)) ซึ่งดูดซับได้ดีกับดินเหนียวหรือดินที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ แมงกานีสไฮดรอกไซด์ และสารอินทรีย์ ทั้งนี้อาร์เซนเตตสามารถตกตะกอนในภาพของเฟอร์ริกอาร์เซนเตตได้ในดินที่มีองค์ประกอบของเหล็กปริมาณมาก

#### ตารางที่ 1 ปริมาณอาร์เซนิกในดินของประเทศต่างๆ

ประเทศ	ประเภทดินหรือตะกอนดิน	จำนวนตัวอย่าง	ปริมาณอาร์เซนิก (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ยปริมาณอาร์เซนิก (มก./กก.)
เบงกอล, อินเดีย	ตะกอน	2,235	10 – 196	-
บังกลาเทศ	ตะกอน	10	9.0 – 28	22.1
อาร์เจนตินา	ทุกประเภท	20	0.8 – 22	5.0
จีน	ทุกประเภท	4,095	0.01 – 626	11.2
ฝรั่งเศส	ทุกประเภท	-	0.1 – 5	2.0
เยอรมัน	ในเมืองเบอร์ลิน	2	2.5 – 4.6	3.5
อิตาลี	ทุกประเภท	20	1.8 – 60	20.0
ญี่ปุ่น	ทุกประเภท	358	0.4 – 70	11.0
	ดินปลูกข้าว	97	1.2 – 38.2	9.0
เม็กซิโก	ทุกประเภท	18	2 – 40	14.0
แอฟริกาใต้		2	3.2 – 3.7	3.0
สวิตเซอร์แลนด์		2	2 – 2.4	2.2
สหรัฐอเมริกา	หลายรัฐ	52	1.0 – 20	7.5
	ในเมืองทิลเลอร์	1,215	1.6 – 72	7.5

ที่มา: (Mandal และ Suzuki, 2002)

ประเทศไทยพบการปนเปื้อนอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อมเกิดจากอุตสาหกรรมถลุงแร่ เช่น เหมืองแร่ดีบุกและเหมืองแร่ทองคำ ในเขตพื้นที่ ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช และเหมืองแร่ดีบุกในเขตพื้นที่ อ.บันนังสตา จ.ยะลา ซึ่งมีปริมาณอาร์เซนิกสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งกำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งกำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547: ออนไลน์) หรือ 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามข้อกำหนดขององค์กรพิทักษ์

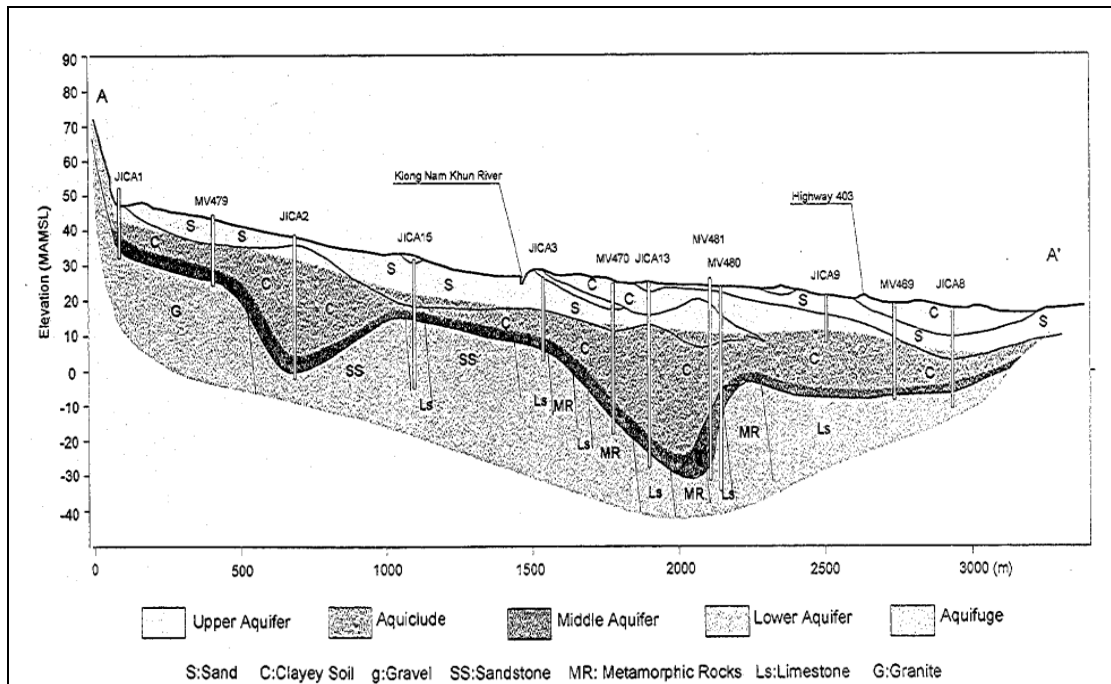
สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (US-EPA) (Singh และคณะ, 2014) ปริมาณอาร์เซนิกปนเปื้อนในดิน และหางแร่ในพื้นที่ อ.ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช และ อ.บันนังสตา จ.ยะลา แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนอาร์เซนิกในพื้นที่ทั้งสองในช่วง 47 – 1,220 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จากรายงานการศึกษาติดตามปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนู อ.ร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ของกรมทรัพยากรธรณี (อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์, 2540) อธิบายลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ อ.ร้อนพิบูลย์ ว่ามีลักษณะเป็นตะกอนเชิงเขาและตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารี ซึ่งประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยมีภาพตัดตามยาวแสดงประเภทดินในพื้นที่ปนเปื้อนดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงว่าดินที่อยู่เหนือชั้นหินใต้ผิวดิน (Upper aquifer) นั้นเป็นดินประเภทดินเหนียวและดินทรายทั้งหมด ในส่วนลักษณะดินของพื้นที่ปนเปื้อน อ.บันนังสตา จ.ยะลา จากข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์จังหวัดยะลา ของกรมโยธาธิการและผังเมือง พบว่า ดินในพื้นที่ อ.บันนังสตา เป็นดินที่เกิดจากตะกอนทับถมของตะกอนลำน้ำ เป็นกลุ่มดินสนิมแม่น้ำ ซึ่งดินในบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนนั้นเป็นดินประเภทดินเหนียว (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2550) ทั้งนี้ดินที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นดินประเภทดินเหนียวและดินทรายเช่นเดียวกับดินที่พบในพื้นที่ปนเปื้อนทั้งสองแห่ง รวมทั้งความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ปนเปื้อนในดินที่ทำการศึกษาก็เป็นความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงของการปนเปื้อนจริงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 ปริมาณอาร์เซนิกปนเปื้อนในดินและหางแร่ในพื้นที่ อ.ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช และ อ.บันนังสตา จ.ยะลา

ตัวอย่าง	ที่ตั้ง	จำนวนตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ปริมาณอาร์เซนิก (มก./กก.)	
				ปริมาณอาร์เซนิก	ค่าเฉลี่ย±S.D.
<b>ดิน</b>					
วัดร้อนพิบูลย์	ร้อนพิบูลย์	5	5.5 – 6.8	21 – 83	47±26
10 เมตร จากส่วนทำชั้นแร่ดีบุก	ร้อนพิบูลย์	5	4.5 – 5.1	810 – 1,400	1,220±240
50 เมตร จากส่วนทำชั้นแร่ดีบุก	ร้อนพิบูลย์	5	5.1 – 6.0	200 – 3,000	260±50
ดินตะกอนพัดพา	ร้อนพิบูลย์	9	4.1 – 6.5	160 – 1,560	520±460
เขาร่อนนา	ร้อนพิบูลย์	13	3.9 – 5.8	150 – 1,910	690±460
เหมืองแร่NASA	บันนังสตา	4	5.1 – 6.6	540 – 630	580±60
<b>หางแร่</b>					
ดอนไม้หอม	ร้อนพิบูลย์	4	2.7 – 4.1	9,780 – 14,200	12,300±2,300
ถ้ำทะเล	บันนังสตา	8	2.5 – 4.0	1,670 – 7,010	4,040±2,100
นาสวน	บันนังสตา	10	2.2 – 4.8	3,070 – 13,100	6,620±3,280
พินโย	บันนังสตา	10	2.5 – 5.1	3,520 – 15,900	8,010±4,940

ที่มา: (Visoottiviseth, Francecesconi และ Sridokchan, 2001)

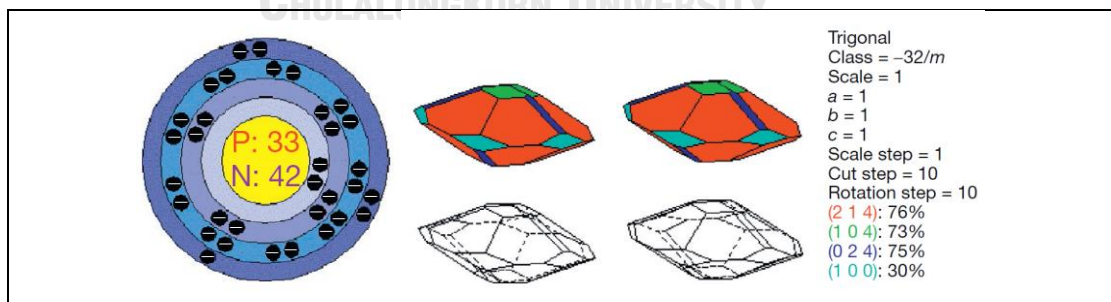


ภาพที่ 1 ภาพตัดตามยาวแสดงประเภทดินบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนอาร์เซนิก  
ในพื้นที่ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช

(Mitsui mineral development engineering co,LTD. และ Kokusai Kogyo co,LTD., 2000)

### 2.1.1 สมบัติทั่วไปของอาร์เซนิก

อาร์เซนิกเป็นธาตุกึ่งโลหะ มีลักษณะเป็นเงา มีสีเทาและเปราะ มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 74.92 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่ 613 และ 817 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกเป็นไตรโกนอล-เฮกซะโกนอล สกาเลโนฮีดรอล (Trigonal-hexagonal scalenohedral) (Kapp, 2016) โครงสร้างอะตอมและโครงสร้างผลึกของอาร์เซนิกแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างอะตอมและโครงสร้างผลึกของอาร์เซนิก (Kapp, 2016)

สารประกอบอาร์เซนิกที่พบโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม (Kapp, 2016) คือ สารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิก สารประกอบอินทรีย์อาร์เซนิกและก๊าซอาร์ซีน อาร์เซนิกมีเลขออกซิเดชันทั้งหมด 4 แบบ คือ -3, 0, +3 และ +5 ซึ่งสารประกอบอาร์เซนิกที่พบมากที่สุดตามธรรมชาติคือ อาร์เซไนท์ ( $AsO_3^{3-}$ ) และ อาร์เซเนต ( $AsO_4^{3-}$ ) ส่วนที่พบในภาพสารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิกที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 หรือ

ไตรวาเลนซ์ ได้แก่ อาร์เซนิกไดรอกไซด์ ( $As_2O_3$ ), อาร์เซนไนท์ ( $AsO_2^{2-}$ ) และอาร์เซนิกไตรคลอไรด์ ( $AsCl_3$ ) และในส่วนของสารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิกที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +5 หรือเพนตะวาเลนซ์ ได้แก่ อาร์เซนิกเพนตะออกไซด์ ( $As_2O_5$ ), กรดอาร์เซนิก ( $H_3AsO_4$ ) และอาร์เซเนต ( $AsO_4^{3-}$ )

## 2.1.2 ผลกระทบของอาร์เซนิกต่อสุขภาพ

มนุษย์สามารถรับอาร์เซนิกเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งในภาพอนินทรีย์อาร์เซนิกและอนินทรีย์อาร์เซนิกผ่านการหายใจหรือการกิน ส่วนการดูดซึมอาร์เซนิกผ่านผิวหนังมีอัตราการดูดซึมต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยมวล (Mandal และ Suzuki, 2002) อาร์เซนิกเป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ซึ่งสารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิกมีค่า Lethal Dose 50 (LD50) ในช่วง 4 – 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว โดยอาร์เซนไนท์ ( $As(III)$ ) มีค่า LD50 ในช่วง 4 – 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว และอาร์เซเนต ( $As(V)$ ) มีค่า LD50 ในช่วง 14 – 18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว สำหรับสารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิกมีความเป็นพิษเช่นเดียวกันแต่มีค่าต่ำกว่าสารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิกในทุกกรณี เช่น อาร์เซเบนอีนมีค่า LD50 ประมาณ 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว และกรดไดเมททิวอาร์เซนิก (DMA(V)) มีค่า LD50 เท่ากับ 644 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว (Kapp, 2016) ซึ่งอาร์เซนิกนั้นมีค่าบ่งชี้การก่อมะเร็งขององค์การวิจัยมะเร็งนานาชาติหรือ International agency for research on cancer (IARC) ประเภท 1 หรือถูกจัดให้เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์แน่นอน (International agency for research on cancer (IARC), 2012: online)

อาร์เซนิกเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกทางปัสสาวะ อุจจาระ ถ้าอาร์เซนิกถูกกำจัดไม่หมดก็จะไปสะสมที่เล็บ ผมและกระดูก พิษที่เกิดจากอาร์เซนิกเกิดได้สองลักษณะคือพิษเรื้อรังและพิษเฉียบพลัน (พรพรรณ บวรสาโชติ, 2538) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) พิษเรื้อรัง เกิดจากการสะสมอาร์เซนิกในร่างกายทีละน้อยทำให้มีผลต่อระบบต่างๆ ดังนี้
  - ระบบประสาท ทำให้มีอาการอ่อนเพลีย เหนื่อยง่าย ขาดตามปลายมือปลายเท้า กล้ามเนื้ออ่อนแรง เยื่อปูดตา จมูกและหลอดลมบวม
  - ระบบทางเดินอาหาร ทำให้เบื่ออาหาร ปวดท้อง คลื่นไส้
  - ทางผิวหนัง หากได้รับอาร์เซนิกปริมาณ 1 – 5 มิลลิกรัมต่อวัน อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานจะทำให้ผิวหนังมีสีดำคล้ำเรียกว่า ไฮเปอร์พิกเมนต์ (Hyperpigment) เนื่องจากเม็ดสีที่ผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีดำ ฝ่ามือ ฝ่าเท้ามีตุ่มแข็งด้านซึ่งเรียกว่า ไฮเปอร์เคราโทซิส (Hyperkeratosis) นอกจากนี้อาจมีอาการอื่นๆ ร่วม เช่น เล็บไม่งอก ผมร่วง และมะเร็งผิวหนัง เป็นต้น
  - อวัยวะภายใน เกิดเนื้องอกในอวัยวะที่สำคัญ ไตอักเสบและหัวใจวาย
- 2) พิษเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับอาร์เซนิกปริมาณมากฉับพลัน
  - หากได้รับอาร์เซนิกปริมาณ 70 – 80 มิลลิกรัม จะทำให้ระบบประสาทส่วนกลางแน่นิ่งหมดสติ ชีพจรอ่อน และถึงแก่ความตายได้

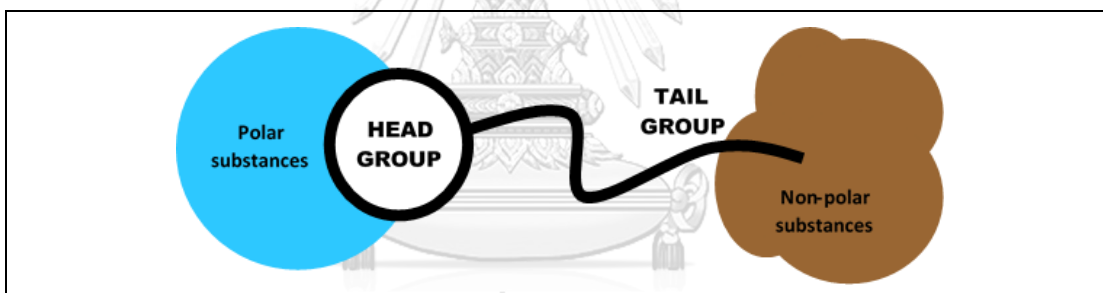
- หากสุดคมไอหรือฝุ่นของอาร์เซนิก ทำให้จุ่มและหลอดลมใหม่เกรียม เจ็บคอ หายใจขัด และปอดบวม

## 2.2 สารล้างดิน (Washing Agent)

สารล้างดินหมายถึงสารละลายหรือของเหลวที่ใช้ในการล้างดินเพื่อวัตถุประสงค์ในการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากดิน ซึ่งสารล้างดินที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิท และสารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์

### 2.2.1 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารประเภทแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic) ซึ่งมีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนหัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขั้วหรือไอออน ที่สามารถรวมตัวกับโมเลกุลที่มีขั้วได้ดี และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ประกอบด้วยโมเลกุลที่ไม่มีขั้วหรือไฮโดรคาร์บอนสายยาว ที่สามารถรวมตัวกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วได้ดี แสดงดังภาพที่ 3 ด้วยโครงสร้างดังกล่าวทำให้สารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยให้สาร 2 ชนิด ที่ไม่รวมตัวกันให้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Rosen, 2004)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวแบ่งได้ตามประเภทประจุของส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวซึ่งสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท (Rosen, 2004) ดังนี้

#### 1) สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประจุลบมีโครงสร้างส่วนหัวที่มีขั้วแสดงประจุลบ เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ประจุลบ ในธรรมชาติสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้มีจำนวนมาก ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวประจุลบ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) และกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid)

#### 2) สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประจุบวกมีโครงสร้างส่วนหัวที่แสดงขั้วประจุบวก เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ประจุบวก ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวประจุบวก เช่น สารกลุ่มเอมีน



### 3) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Zwitterionics surfactant)

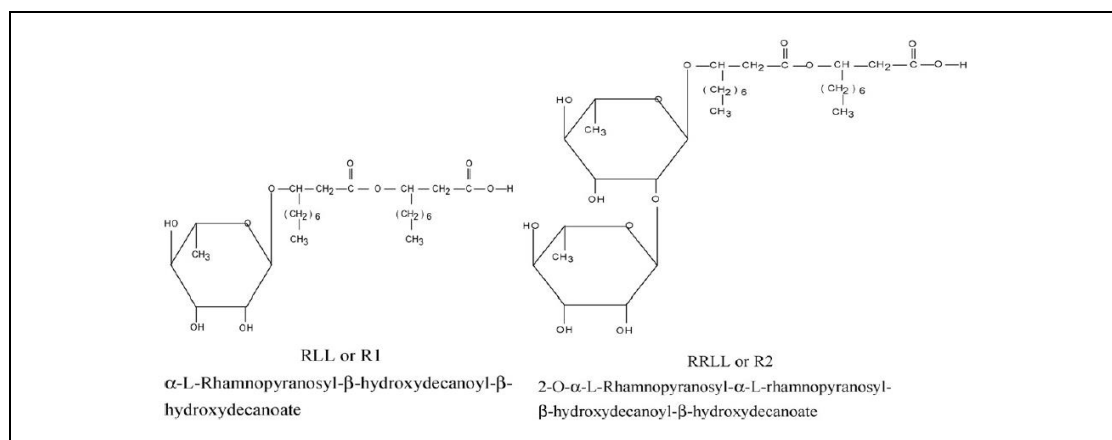
สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบมีโครงสร้างส่วนหัวที่สามารถแสดงได้ทั้งประจุบวกและลบขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย หากสารละลายมีค่าพีเอชเป็นกรดสารลดแรงตึงผิวจะแสดงประจุที่หัวเป็นประจุบวก และหากสารละลายมีค่าพีเอชเป็นเบสสารลดแรงตึงผิวจะแสดงประจุที่หัวเป็นประจุลบ ตัวอย่างเช่น สารลดแรงตึงผิวในกลุ่มกรดอะมิโน

### 4) สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุมีโครงสร้างส่วนหัวที่ไม่แสดงประจุ เมื่อละลายน้ำจึงไม่เกิดการแตกตัวของประจุ ตัวอย่างเช่น เอสเทอร์ของกรด โพลีออกซีเอทิลีน (Polyoxyethylene) และ แอลกอฮอล์อีทอกซิเลต (Ethoxylate Alcohol)

## 2.2.2 สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด (Rhamnolipids Surfactant)

สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดเป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพกลุ่มไกลโคลิพิดสกัดจากแบคทีเรียชิวโดโมนาส เอรูจินินซา (*Pseudomonas Aeruginosa*) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่สกัดได้ประกอบไปด้วยแรมโนลิพิด 2 ประเภท คือ R1 ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น  $C_{26}H_{48}O_9$  มีน้ำหนักโมเลกุล 504.6 กรัมต่อโมล และ R2 ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น  $C_{32}H_{58}O_{13}$  มีน้ำหนักโมเลกุล 650.8 กรัมต่อโมล (Wang และ Mulligan, 2008) ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ R1 และ R2 แสดงดังภาพที่ 4 สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดนี้มีค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration: CMC) ประมาณ 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร (Ochoa-Loza และคณะ, 2006) โครงสร้างของ R1 และ R2 ที่แตกต่างกันทำให้มีประสิทธิภาพในการนำมาใช้บำบัดแตกต่างกัน เช่น R1 สามารถใช้กำจัดสารประกอบโลหะได้ดีกว่า R2 เป็นต้น (Wang และ Mulligan, 2008) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ของ บริษัท เอจีเอไอ เทคโนโลยี (AGAE Technologies, LLC) ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้ชื่อการค้า AGAE R90 มีองค์ประกอบของ R1 ต่อ R2 ที่ 3:2 โดยมวล และมีความบริสุทธิ์ของสารร้อยละ 90



ภาพที่ 4 โครงสร้างเคมีของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด R1 และ R2

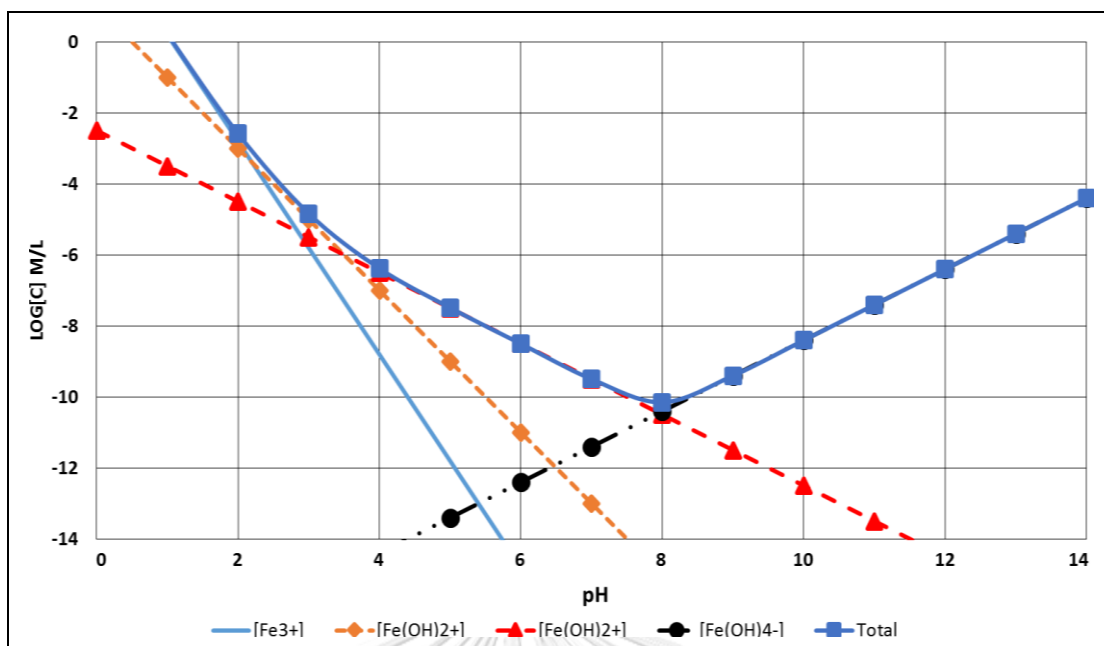
(Wang และ Mulligan, 2008)

เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดเป็นสารชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ รวมทั้งไม่ใช่สารตกค้างยาวนาน (Persistent) ไม่มีการสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตและไม่เป็นพิษ (Sigma-Aldrich, 2015a: ออนไลน์) จึงนับว่าเป็นสารไม่อันตราย เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดดิน ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับดินหลายประการ เช่น ช่วยเพิ่มการย่อยสลายสารปนเปื้อนอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ ช่วยเพิ่มการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากดินด้วยวิธีการล้างดิน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการกำจัดสารปนเปื้อนในกลุ่มที่ทำพันธะกับดิน เช่น  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  นอกจากนี้ยังเป็นสารชีวภาพที่สามารถใช้เป็นยากำจัดศัตรูพืชได้อีกด้วย (Ochoa-Loza และคณะ, 2006)

สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดมีขนาดและภาพร่างของไมเซลล์เปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช (Dahrazma, Milligan และ Nieh, 2008) ที่พีเอชเป็นเบสแรมโนลิพิดมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Large aggregate) ขนาดใหญ่กว่า 2,000 อนุภาคและพบไมเซลล์ขนาด 15 – 17 อนุภาค ที่พีเอชเป็นกรดพบว่าแรมโนลิพิดเกิดเป็นเวสสิเคิล (Vesicle) ซึ่งมีแกนกลางเป็นส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวล้อมรอบด้วยสารลดแรงตึงผิวที่หันส่วนหัวออกจากแกนกลางอีกชั้นหนึ่ง มีขนาด 500 – 600 อนุภาค นอกจากนี้การเกิดสารประกอบระหว่างไมเซลล์กับโลหะไม่มีผลต่อขนาดของไมเซลล์แต่อย่างใด

### 2.2.3 เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride)

เฟอร์ริกคลอไรด์มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $FeCl_3$  มีน้ำหนักโมเลกุล 162.21 กรัมต่อโมล มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวที่ 316 และ 306 องศาเซลเซียส (Sigma-Aldrich, 2015b: ออนไลน์) เฟอร์ริกคลอไรด์ละลายน้ำได้ดีมากเท่ากับ 430 กรัมต่อน้ำหนักสารละลายหนึ่งกิโลกรัม ที่อุณหภูมิศูนย์องศาเซลเซียส หรือ 480 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์มีสีน้ำตาลแดงและมีฤทธิ์เป็นกรดอย่างรุนแรง (คมสัน ดันยีนยงค์, 2542) โดยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 การละลายของเฟอร์ริกคลอไรด์ขึ้นกับค่าพีเอช แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟแสดงการละลายของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ในน้ำบริสุทธิ์  
(Qasim, Edward และ Zhu, 2000)

เฟอร์ริกคลอไรด์ละลายน้ำได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) คีโตน (Ketone) และเอมีน (Amine) เป็นต้น แต่ละลายได้น้อยในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน (Benzene) และเฮกเซน (Hexane) นอกจากนี้เฟอร์ริกคลอไรด์ยังเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ทำให้โลหะหลายชนิด เช่น เหล็ก แมงกานีส และดีบุก สามารถละลายในเฟอร์ริกคลอไรด์ได้ (คมสัน ต้นยืนยงค์, 2542)

### 2.3 การบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนัก

วิธีการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักสามารถแบ่งได้ 3 กระบวนการ ประกอบด้วยกระบวนการบำบัดทางกายภาพ กระบวนการบำบัดทางชีวภาพและกระบวนการบำบัดทางเคมี (Yao และคณะ, 2012) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical remediation)

กระบวนการทางกายภาพที่นำมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักประกอบด้วยวิธีการแทนที่ดินและวิธีการใช้ความร้อน ในส่วนของวิธีการแทนที่ดิน (Soil replacement) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีสำหรับระบบนิเวศอิสระ (Isolate ecosystem) เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดผลกระทบจากดินปนเปื้อน แต่วิธีการบำบัดนี้เป็นงานขนาดใหญ่และค่าใช้จ่ายสูง จึงเหมาะสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดเล็กและสารปนเปื้อนบางประเภทเท่านั้นแบ่งย่อยเป็น 3 วิธี ดังนี้

- การแทนที่ดินเดิม (New soil replacement) โดยการขุดย้ายดินที่ปนเปื้อนออกจากพื้นที่แล้วนำดินปนเปื้อนไปผ่านขั้นตอนการทำให้เสถียรก่อนนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบของเสียอันตราย ส่วนพื้นที่

ปนเปื้อนให้นำดินใหม่ใส่แทนที่ดินเดิม วิธีการนี้เหมาะสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดเล็ก อีกทั้งต้องมีการจัดการดินปนเปื้อนที่ขุดออกมาอย่างเหมาะสมอีกด้วย

- การเจือจางสารปนเปื้อน (Soil spading) ดำเนินการโดยขุดดินในพื้นที่ปนเปื้อนลงไปลึกๆ เพื่อให้ดินปนเปื้อนผสมกับดินส่วนที่ไม่ปนเปื้อนในพื้นที่ ทำให้มีความเข้มข้นของการปนเปื้อนลดต่ำลง วิธีการนี้เหมาะสมกับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนระดับต่ำมากเท่านั้น

- การเติมดินใหม่ (New soil importing) คือการนำดินใหม่เติมลงไปในพื้นที่ปนเปื้อน เพื่อให้มีความเข้มข้นของการปนเปื้อนลดต่ำลง

วิธีการใช้ความร้อน (Thermal desorption) คือการกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนออกจากดิน โดยใช้หลักการระเหยด้วยการเพิ่มความร้อนลงในดิน เช่น ไอน้ำ คลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด เป็นต้น เพื่อให้สารปนเปื้อนเช่นปรอท (Hg) หรืออาร์เซนิก (As) กลายเป็นไอและรวบรวมไอระเหยออกจากระบบ วิธีการบำบัดนี้มีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ง่าย เครื่องมือและอุปกรณ์การบำบัดสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย รวมทั้งดินที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันที อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่เครื่องมือและอุปกรณ์มีราคาแพงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดนาน

## 2. กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological remediation)

กระบวนการทางชีวภาพที่นำมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักประกอบด้วย การบำบัดโดยใช้พืช การบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ และการบำบัดโดยใช้สัตว์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- กระบวนการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) เป็นการใช้พืชเพื่อจับสารปนเปื้อน โดยการดูดซับสารปนเปื้อนร่วมกับการตกตะกอนและการทำปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ลดการกระจายตัวของสารปนเปื้อนและป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนไปยังแหล่งน้ำหรือห่วงโซ่อาหาร และพืชบางชนิดยังสามารถเปลี่ยนแปลงโลหะหนักปนเปื้อนในดินให้กลายเป็นไอหรือก๊าซได้ นอกจากนี้พืชบางชนิดยังสามารถดูดซับโลหะหนักและสะสมในพืชได้อีกด้วย

- กระบวนการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ (Biological remediation) เป็นการใช้จุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนแปลงสารโลหะหนักในทางกายภาพและเคมี แต่ไม่สามารถย่อยหรือทำลายโลหะหนักได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดโดยจุลินทรีย์ขึ้นกับหลายปัจจัย ทั้งอุณหภูมิ ความชื้น ค่าพีเอช เป็นต้น

- กระบวนการบำบัดโดยใช้สัตว์ (Animal remediation) เป็นการใช้สัตว์บางประเภทอย่างไส้เดือนดินในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งไส้เดือนจะทำกรย่อยและลดปริมาณสารโลหะหนักปนเปื้อนในดินและสะสมในตัวไส้เดือนแทน

### 3. กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical remediation)

กระบวนการทางเคมีที่นำมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักประกอบด้วย การใช้สารเคมีชะล้างสารปนเปื้อน การใช้สารเคมีตรึงสารปนเปื้อน และการใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การใช้สารล้างดินเพื่อล้างดินหรือชะดิน (Soil washing and soil flushing) คือการล้างเอาสารปนเปื้อนออกจากตัวของไหล เช่น น้ำ สารละลายกรด สารละลายเบส สารลดแรงตึงผิว หรือก๊าซ โดยการล้างดิน (Soil washing) เป็นการบำบัดแบบนอกพื้นที่ปนเปื้อน (Ex-situ) ต้องทำการขุดดินออกจากพื้นที่ปนเปื้อนนำมาผสมกับสารล้างดิน ส่วนการชะดิน (Soil flushing) เป็นการบำบัดแบบในพื้นที่ปนเปื้อน (In-situ) โดยใส่สารล้างดินลงในท่อที่ฝังในดินเพื่อให้สารล้างดินทำการชะสารปนเปื้อนออกจากดิน จากนั้นจึงทำการรวบรวมสารล้างดินขึ้นมาเพื่อนำไปบำบัดต่อไป ทั้งนี้กลไกการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากดินโดยใช้สารล้างดินประกอบด้วยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอน การดูดซับ หรือคีเลชัน โลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินจะละลายในสารล้างดินและสามารถนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้จากสารล้างดิน สารล้างดินที่นำมาใช้ส่วนมากประกอบไปด้วย ตัวทำละลายอินทรีย์ สารคีเลต และสารลดแรงตึงผิว

- การใช้สารเคมีตรึงสารปนเปื้อน (Chemical fixation) คือการเติมสารเคมีหรือวัสดุลงไป ในดินปนเปื้อนเพื่อให้กลายเป็นของแข็งไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนลง ในน้ำใต้ดิน ทั้งนี้แม้ว่าวิธีการใช้สารเคมีตรึงสารปนเปื้อนจะช่วยบำบัดดินได้ แต่ทำให้สิ่งแวดล้อมในพื้นที่บำบัดเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างดินเดิม

- การใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการบำบัด (Electrokinetic remediation) คือการสร้างสนามไฟฟ้าในดินเพื่อให้สารปนเปื้อนถูกกำจัดโดยประจุไฟฟ้า วิธีการนี้เหมาะสำหรับดินที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ซึ่งมีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมของดินเดิม

ในทางปฏิบัติการเลือกเทคโนโลยีในการบำบัดดินปนเปื้อนต้องทำการสำรวจพื้นที่และเก็บรวบรวมข้อมูลของสารปนเปื้อนเพื่อนำมาประกอบการพิจารณาการเลือกเทคโนโลยีในการบำบัด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) ซึ่งปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

- ชนิดของสารปนเปื้อนเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องระบุเพื่อเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม เนื่องจากเทคโนโลยีการบำบัดนั้นถูกพัฒนาขึ้นตามลักษณะเฉพาะของสารปนเปื้อน เช่น การบำบัดโดยใช้ความร้อนเพื่อระเหยสารปนเปื้อนออกจากดิน ดังนั้นแล้วสารปนเปื้อนที่มีความสามารถในการระเหยต่ำ ละลายน้ำได้ดี ไม่สามารถใช้วิธีการดังกล่าวได้

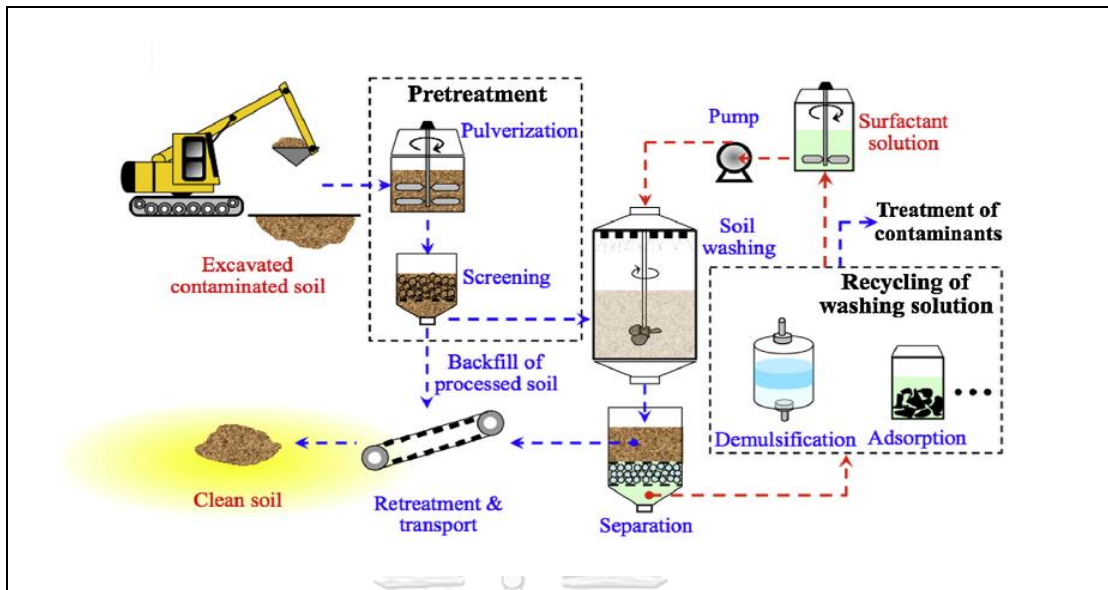
- ปริมาณและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน หากสารปนเปื้อนมีความเข้มข้นสูงและมีปริมาณมาก การใช้เทคโนโลยีการบำบัดโดยพืชหรือจุลินทรีย์ไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากพืชหรือจุลินทรีย์จะตายเพราะความเป็นพิษของสารปนเปื้อน

- ตัวกลางที่ปนเปื้อน ดินแต่ละประเภทมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน และยังมีอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างดินและสารปนเปื้อนแตกต่างกันด้วย เช่น ดินเหนียวเนื้อละเอียด จะดูดซับสารปนเปื้อนได้ดีและมีความหนาแน่นสูงและความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ทำให้การบำบัดโดยวิธีชะดิน (Soil flushing) ไม่มีความเหมาะสม
- ลักษณะของพื้นที่ปนเปื้อน เช่น ความลาดชัน ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน สภาพภูมิประเทศ ลักษณะการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ เป็นต้น ส่งผลโดยตรงต่อการเลือกเทคโนโลยีในการบำบัด เช่น พื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินตื้น การบำบัดโดยวิธีชะดิน (Soil flushing) จะไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนไปยังน้ำใต้ดินได้โดยง่าย
- วิธีและการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน ต้องเลือกเทคโนโลยีที่สามารถควบคุมการปนเปื้อนให้ได้มากที่สุด

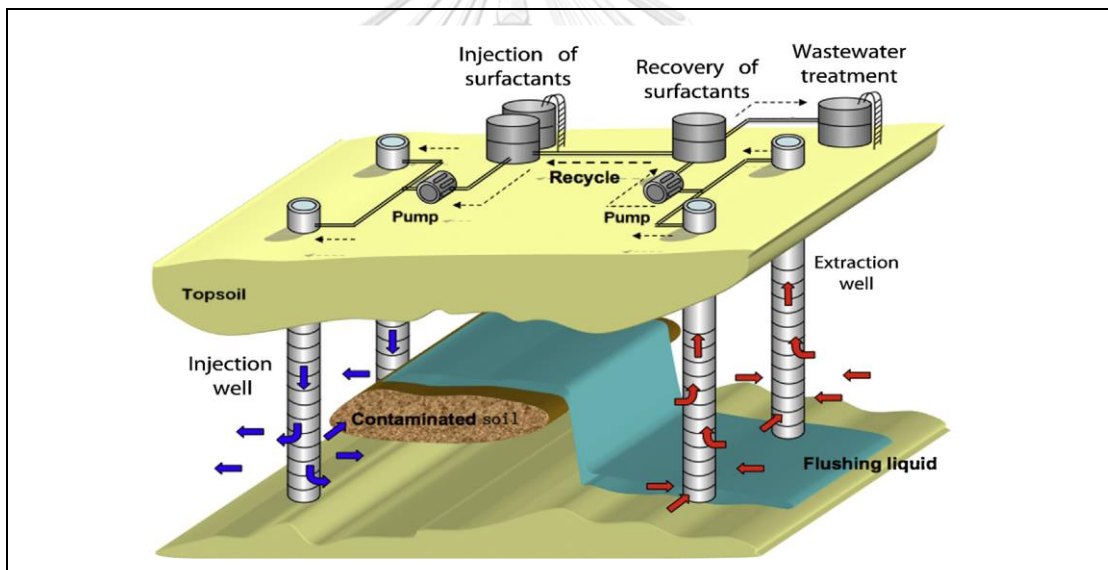
### 2.3.1 การบำบัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

การใช้สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดดินปนเปื้อนต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่นำมาใช้ เช่น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวกับดิน ความสามารถในการละลายของสารลดแรงตึงผิว และความเป็นพิษของสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น การใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารล้างดินสามารถช่วยเพิ่มการกำจัดสารปนเปื้อนและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดทางชีวภาพ สำหรับการกำจัดโลหะหนักโดยสารลดแรงตึงผิวอาศัยกลไกการละลาย การสร้างสารประกอบร่วมกับสารลดแรงตึงผิวและการแลกเปลี่ยนประจุของสารปนเปื้อนกับสารลดแรงตึงผิว (Mao และคณะ, 2014)

ในทางปฏิบัติการบำบัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวสามารถดำเนินการได้นอกพื้นที่ปนเปื้อน (Ex-situ) เรียกว่าวิธีการล้างดิน (Soil washing) ดังแสดงในภาพที่ 6 ดินปนเปื้อนจะถูกขุดออกมาจากพื้นที่เพื่อนำมาผสมเข้ากับสารล้างดิน เมื่อการล้างดินสิ้นสุดลงจึงแยกสารล้างดินออกจากดิน และนำดินที่บำบัดแล้วกลับไปกลบพื้นที่เดิม ส่วนสารล้างดินนำไปบำบัดต่อไป นอกจากนี้การใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารล้างดินยังสามารถดำเนินการได้ภายในพื้นที่ปนเปื้อน (In-situ) ดังแสดงในภาพที่ 7 เรียกว่า วิธีการชะดิน (Soil flushing) โดยใส่สารล้างดินผ่านท่อที่เจาะลงไปภายในพื้นที่ปนเปื้อน และปล่อยให้สารล้างดินชะดินที่ปนเปื้อนเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออกจากดินในภาพของสารละลาย และทำการรวบรวมสารละลายนั้นผ่านท่อกลับขึ้นมายังพื้นดิน เพื่อนำสารล้างดินดังกล่าวไปบำบัดต่อไป



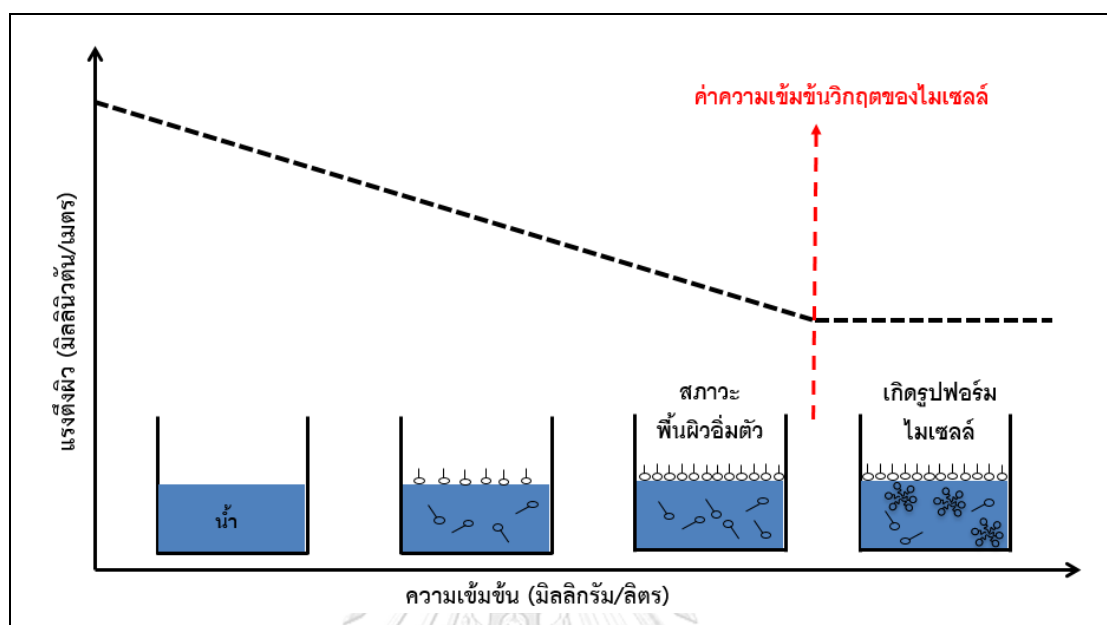
ภาพที่ 6 การบำบัดดินโดยวิธีล้างดิน (Soil Washing) (Mao และคณะ, 2014)



ภาพที่ 7 การบำบัดดินโดยวิธีชะดิน (Soil Flushing) (Mao และคณะ, 2014)

เมื่อสารลดแรงตึงผิวปรากฏในระบบที่มี 2 เฟส เช่น น้ำและดิน สารลดแรงตึงผิวบางส่วนจะดูดซับบนพื้นผิวของดินและทำให้สารปนเปื้อนที่ดูดซับอยู่บนดินละลายหรือเกิดการรบกวนประกอบร่วมกับสารลดแรงตึงผิวหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงประจุกับสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีแนวโน้มที่จะละลายน้ำและส่วนหางมีแนวโน้มที่จะรวมกับดินหรือสารปนเปื้อน ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำๆ สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของดินกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลวในภาพของโมโนเมอร์ (Monomer) เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น สารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปอยู่ในเฟสของน้ำเป็นผลให้แรงตึงผิวลดต่ำลงและทำให้สารปนเปื้อนละลายน้ำมากขึ้น หากเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวให้มากขึ้นสารลดแรงตึงผิวจะเริ่มรวมตัวเป็นไมเซลล์ ซึ่งจุดที่

สารลดแรงตึงผิวเริ่มต้นรวมตัวเป็นไมเซลล์นี้เรียกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical micelle concentration: CMC) แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration: CMC)

การพิจารณาเลือกสารลดแรงตึงผิวเพื่อการบำบัดดินขึ้นกับลักษณะการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนดินแต่ละประเภท ความสามารถในการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวกับสารปนเปื้อน ความเป็นพิษและความสามารถในการย่อยสลายของสารลดแรงตึงผิว รวมทั้งปัจจัยทางด้านราคาและขนาดพื้นที่ปนเปื้อน ดังนั้นแล้วในทางทฤษฎีสารลดแรงตึงผิวควรมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนที่ความเข้มข้นต่ำกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical micelle concentration: CMC) เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการบำบัดดินปนเปื้อน อย่างไรก็ตามเมื่อสารลดแรงตึงผิวสัมผัสกับดินย่อมเกิดการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวกับดินอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ยิ่งสารลดแรงตึงผิวถูกดูดซับกับดินมากเท่าไรยังมีปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่จะรวมตัวกับสารปนเปื้อนน้อยลง ดังนั้นแล้วสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการบำบัดดินจึงควรละลายน้ำได้ดี ดูดซับกับดินในปริมาณน้อย ไม่เป็นพิษ รวมทั้งสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติอีกด้วย

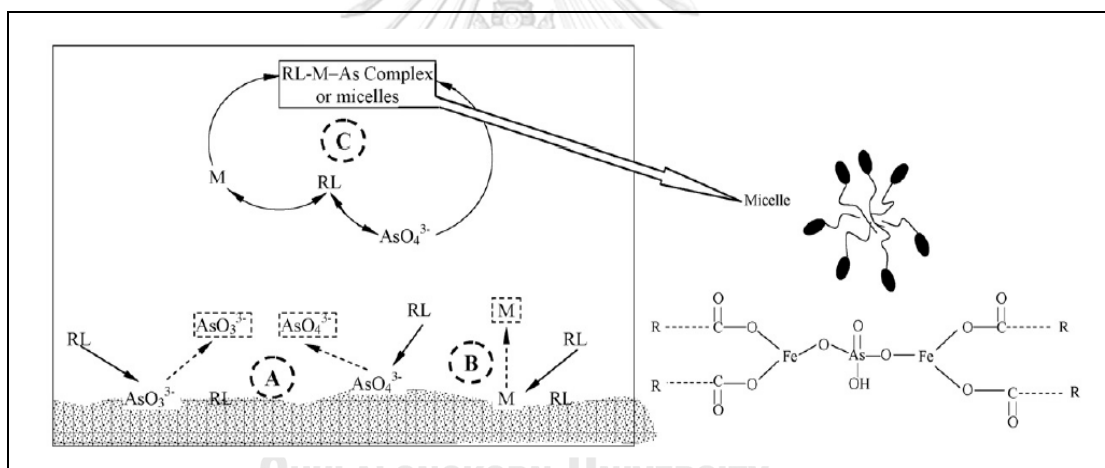
ส่วนการกำจัดอาร์เซนิกจากดินปนเปื้อนต้องคำนึงว่าอาร์เซนิกในภาพทั่วไปนั้นเป็นประจุลบของสารประกอบแอนไอออนิก (Anionic complexes) เช่น ออกซีแอนไอออน ซึ่งสามารถรวมตัวกับสารลดแรงตึงผิวประจุบวกและทำให้เกิดสารประกอบตกค้างที่มีความคงตัวมากกว่าเดิม ทั้งนี้การใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบมีแนวโน้มในการกำจัดอาร์เซนิกที่ดีกว่า โดยอาศัยแรงผลักประจุทำให้อาร์เซนิกไม่ดูดซับกับดินและกระจายตัวในสารละลายแทน (Mao และคณะ, 2014)

ในกระบวนการล้างดินด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิทพบว่าอาร์เซนิกมีแนวโน้มถูกกำจัดพร้อมกับโลหะด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิทออกจากทางแร่ที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักหลายชนิด



โดยเฉพาะกับเหล็ก (Wang และ Mulligan, 2008) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตอาจเกิดการรวมตัวกับอาร์เซนิกและโลหะเกิดเป็นสารประกอบละลายน้ำหรือกำจัดอาร์เซนิกออกด้วยไมเซลล์ทำให้อาร์เซนิกไม่จับกับโลหะและเกิดการตกตะกอนภายในดิน โดยเรียกกลไกการสร้างสารประกอบดังกล่าวว่าสะพานเชื่อมโลหะ (Metal bridging mechanism) นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตยังช่วยเพิ่มค่าความเปียก (Wettability) ให้กับหางแร่เป็นผลให้สารปนเปื้อนในหางแร่สามารถละลายในสารล้างดินได้มากขึ้น

แม้ว่าโดยทั่วไปสารลดแรงตึงผิวควรดูดซับกับดินในปริมาณน้อย แต่การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตบนดินเป็นกลไกที่สำคัญในการช่วยกำจัดอาร์เซนิกออกจากดิน เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบจะแทนที่ประจุลบของอาร์เซนิกที่ดูดซับอยู่กับดินเป็นผลให้อาร์เซนิกคายการดูดซับ นอกจากนี้การดูดซับของแรมโนลิพิตบนดินยังช่วยเพิ่มค่าประจุลบของศักย์ซีตา (Negative zeta potential) ของดินเป็นผลให้อาร์เซนิกถูกกำจัดออกจากดินมากขึ้นเนื่องจากแรงผลักประจุ จากนั้นอาร์เซนิกจะรวมตัวกับสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตและโลหะหรือรวมตัวกับไมเซลล์เกิดเป็นสารประกอบละลายน้ำ กลไกการกำจัดอาร์เซนิกด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กลไกการกำจัดอาร์เซนิกด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิต (Wang และ Mulligan, 2008)

- (A) การกำจัดอาร์เซนิกด้วยการแทนที่ประจุและการลดแรงตึงผิว
- (B) การกำจัดโลหะด้วยการลดแรงตึงผิว
- (C) การรวมตัวอาร์เซนิกกับสารลดแรงตึงผิวโดยไมเซลล์และสะพานเชื่อมโลหะ

## 2.4 สมบัติของดินสังเคราะห์

เนื่องจากดินแต่ละประเภทมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกันเป็นผลให้อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างดินและสารปนเปื้อนแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย ดังนั้นแล้วสมบัติของดินซึ่งเป็นตัวดูดซับสารปนเปื้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำการศึกษา ทั้งนี้การแบ่งประเภทดินสามารถจำแนกได้โดยขนาดอนุภาคดิน โดยแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1.กลุ่มอนุภาคขนาดทราย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ไมครอน ถึง 4.75 มิลลิเมตร 2.กลุ่มอนุภาคขนาดทรายแป้งหรือโคลน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 – 74

ไมครอน และ 3.กลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เล็กกว่า 5 ไมครอน โดยวิธีการ จำแนกประเภทดินนี้ เป็นไปตามวิธีตามมาตรฐาน ASTM D422-63 (ASTM international, 1998) ใน งานวิจัยนี้ทำการศึกษากำจัดอาร์เซนเตปนเปื้อนดิน 2 ประเภท ได้แก่ ดินเหนียวประเภทเคลโอลิไนท์และ ดินทรายประเภททรายซิลิกา โดยดำเนินการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทั้งสองประเภท ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ปริมาณสารอินทรีย์ จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ การดูดซับของอาร์เซนเตและสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิตบนดินตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.4.1 สมบัติทั่วไปของเคลโอลิไนท์ (Kaolinite)

เคลโอลิไนท์หรืออลูมิเนียมซิลิเกตเป็นดินประเภทดินเหนียวมีสูตรทางเคมีคือ  $Al_2O_3 \cdot Si_2 \cdot 2H_2O$  มีมวลโมเลกุล 258.16 กรัมต่อโมล มีสี่เทาอ่อนหรือเกือบไม่มีสี่ ลักษณะผลึกเป็นซูดเฮกซะโกนอล (Pseudohexagonal) ซึ่งมีภาพผลึกเป็นแผ่นไตรคลินิค (Triclinic) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 – 12 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 2.1 – 2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เคลโอลิไนท์สามารถดูดซับสารที่มีอนุภาค ขนาดเล็ก เช่น เลซิธิน (Lecithin) คีโนลีน (Quinoline) และโปรตีน เป็นต้น (World Health Organization, 2005) เคลโอลิไนท์มีน้ำเป็นองค์ประกอบในสูตรเคมี ซึ่งเคลโอลิไนท์จะเริ่มสูญเสียโมเลกุลน้ำในผลึกที่อุณหภูมิ ประมาณ 440 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นกับขนาดอนุภาค (Elimbi, Tchakoute และ Njopwouo, 2010) ในประเทศไทยสามารถพบดินเหนียวเคลโอลิไนท์ได้ที่จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง ลำพูน แพร่ ตาก สุโขทัย อุทัยธานี อุตรดิตถ์ กาญจนบุรี ลพบุรี ปราจีนบุรี ราชบุรี ชลบุรี ระยอง ชุมพร ระนอง พังงา ภูเก็ต สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ยะลา และนราธิวาส เคลโอลิไนท์ เป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคา ภาชนะกระเบื้องเคลือบต่างๆ อิฐทนไฟสำหรับเตาถลุงโลหะ และ ใช้เป็นสารเติมแต่งอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2559ช: ออนไลน์)

#### 2.4.2 สมบัติทั่วไปของทรายซิลิกา (Silica Sand)

ทรายซิลิกาหรือทรายแก้วเป็นดินประเภทดินทรายมีชื่อเรียกหลากหลาย ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ควอร์ต ทราย หรือไวท์ควอร์ต มีสูตรทางเคมีคือ  $SiO_2$  มีมวลโมเลกุล 60.08 กรัมต่อโมล มีสีขาวใส ในประเทศไทยพบทรายซิลิกาได้ในบริเวณภาคตะวันออกและภาคใต้ ได้แก่ จังหวัดระยอง จันทบุรี ตราด สงขลา ภูเก็ต ตรัง นครศรีธรรมราช ชุมพรและปัตตานี ทรายซิลิกาเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตเลนส์ ปริซึม แวนตา อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2559ค: ออนไลน์)

#### 2.4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ดินตามธรรมชาติจะประกอบด้วย อากาศ น้ำ และเม็ดดิน โดยดินแต่ละประเภทเกิดจาก แร่ธาตุที่แตกต่างกันจึงมีค่าความถ่วงจำเพาะของดินแตกต่างกัน ค่าความถ่วงจำเพาะของดินคืออัตราส่วน น้ำหนักดินต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับดินที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นค่าที่ใช้สำหรับการ

คำนวณความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น สัดส่วนช่องว่าง (Void ratio) และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) และความหนาแน่นของดิน เป็นต้น ค่าความถ่วงจำเพาะของดินสามารถวัดได้ด้วยหลักการแทนที่น้ำหนักในน้ำกลั่น (ASTM D854-02) (ASTM international, 2010a) ค่าความถ่วงจำเพาะของดินประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินประเภทต่างๆ

ชนิดของดิน	ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน ( $G_s$ )
Sand	2.65 – 2.67
Silt Sand	2.67 – 2.70
Inorganic Clay	2.70 – 2.80
Soil with Mica or Iron	2.75 – 3.00
Organic Soil	1.00 – 2.60

ที่มา: (สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ, 2549)

#### 2.4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Specific Surface and Pore Volume)

พื้นที่ผิวจำเพาะของดินคือพื้นที่ผิวของทุกอนุภาครวมกันต่อมวลดิน โดยค่าพื้นที่ผิวของดินมีผลต่อค่าการดูดซับ ดินที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า ส่วนปริมาตรรูพรุนคือปริมาตรช่องว่างภายในดิน การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถทำได้โดยการวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุ แล้วนำค่าดังกล่าวมาคำนวณเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ (Lowel และ Shields, 1991) วิธีการดังกล่าวศึกษาโดยบรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller: BET) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับจะเคลือบบนผิวตัวดูดซับเป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ ส่วนก๊าซที่เหลือจะแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุแบบหลายชั้น โดยอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$\frac{1}{W \left[ \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C - 1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

เมื่อ	$W$	=	ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ $P/P_0$
	$W_m$	=	ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว
	$P$	=	ความดันของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ขณะทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)
	$P_0$	=	ความดันอิ่มตัวของก๊าซไนโตรเจน (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

พื้นที่ผิวจำเพาะของดิน

$$S = \frac{W_m N A_{cs} M_s}{M_N}$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะของดิน (ตารางเมตรต่อกรัม)

$W_m$  = ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (โมเลกุล)

N = ค่าคงที่อาโวกราโดร ( $6.023 \times 10^{23}$  โมเลกุลต่อโมล)

$A_{cs}$  = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ( $16.2 \times 10^{-23}$  ตารางเมตร)

$M_s$  = น้ำหนักดิน (กรัม)

$M_N$  = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน (28.01 กรัมต่อโมล)

ปริมาตรรูพรุน

$$V_p = \frac{W_s M_s}{\rho}$$

เมื่อ  $V_p$  = ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)

$W_s$  = ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวต่อมวลดิน (โมเลกุลต่อกรัม)

$M_s$  = น้ำหนักดิน (กรัม)

$\rho$  = ความหนาแน่นของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวดินที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0 \approx 1$ )

#### 2.4.5 ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter Content)

สารอินทรีย์ในดินเกิดจากการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ ซึ่งดินที่นำมาทดสอบทั้งดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาเป็นดินเกรตวึเคราะห์จึงไม่ควรมืองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ดังนั้นแล้วในส่วนของการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าไม่มีมืองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่ในตัวอย่างดินทดลอง ทั้งนี้องค์ประกอบของดินตามธรรมชาติประกอบไปด้วยปริมาณความชื้น (Moisture) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter) การวัดปริมาณสารอินทรีย์ในดินสามารถวัดได้โดยการนำตัวอย่างดินไประเหยน้ำออกที่ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงให้เย็นลงในโถดูดความชื้นแล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก คำนวณน้ำหนักตัวอย่างที่หายไป

เรียกว่าค่าความชื้น ในส่วนของปริมาณเถ้าหาได้โดยนำตัวอย่างเดิมไปเผาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักดินลดลงคงที่ จากนั้นทิ้งให้เย็นลงในเตาอบและโหลดความชื้นแล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก คำนวณน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปเรียกว่าปริมาณเถ้า และส่วนของน้ำหนักที่หายไประหว่างการเผาที่ 440 องศาเซลเซียส คือปริมาณสารอินทรีย์ (ASTM D-2974-00) (ASTM international, 2010b)

#### 2.4.6 จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge)

จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge) หรือ  $pH_{pzc}$  คือค่าที่ถูกนิยามขึ้นจากค่าพีเอชของสารละลายที่ทำให้ประจุที่ผิวของดินเป็นศูนย์ เมื่อดินอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า  $pH_{pzc}$  ค่าประจุที่ผิวของดินจะแสดงค่าประจุบวก ในทางตรงกันข้ามหากดินอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชมากกว่า  $pH_{pzc}$  ค่าประจุที่ผิวของดินจะแสดงค่าประจุลบ การวัดค่าจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์สามารถทำได้โดยวิธีการไตเตรทด้วยค่าพีเอช (pH-titration method) โดยเตรียมสารละลายที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน ให้ครอบคลุมทั้งช่วงกรดและเบส แล้วนำดินใส่ลงไปในสารละลาย จากนั้นทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงเพื่อให้การดูดซับเข้าสู่สมดุล แล้วทำการวัดค่าพีเอชหลังสมดุล จุดที่ค่าพีเอชไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Essington, 2015) ค่าจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินประเภทต่างๆ

ประเภทดิน	$pH_{pzc}$
Quartz [ $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> ]	2.9
Amorphous silica [SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O]	3.5
Bimessite [ $\delta$ -Mn <sub>2</sub> O]	3.8
Kaolinite [Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ]	4.7
Rutile [TiO <sub>2</sub> ]	5.8
Anatase [TiO <sub>2</sub> ]	6.0
Magnetite [Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ]	6.9
Muscovite [KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ]	7.5
$\gamma$ -Alumina [ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	8.5
Hematite [ $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	8.5
Gibbsite [Al(OH) <sub>3</sub> ]	8.9
Corundum [ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	8.9
Goethite [ $\alpha$ -FeOOH]	9.0

ที่มา: (Essington, 2015)

### 2.4.7 พีเอช (pH)

ค่าพีเอชดินหรือค่าความเป็นกรด-เบสของดินเป็นสมบัติทางเคมีของดิน ดินที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 7 เป็นดินกรด ส่วนดินที่มีค่าพีเอชมากกว่า 7 เป็นดินด่าง โดยทั่วไปแล้วดินจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5 ถึง 8 ระดับของค่าพีเอชดินจำแนกได้ 10 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 วิธีการวัดพีเอชดินทำได้โดยผสมดินกับน้ำกลั่นปล่อยทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงแล้วใช้เครื่องวัดพีเอชวัด (ASTM D4972-01) (ASTM international, 2010c)

ตารางที่ 5 ค่าพีเอชดินและระดับความเป็นกรด-เบสของดิน

ค่าพีเอช	นิยาม
< 4.5	กรดแก่รุนแรง
4.5 – 5.0	กรดแก่มาก
5.1 – 5.4	กรดแก่
5.5 – 6.0	กรด
6.1 – 6.5	กรดเล็กน้อย
6.6 – 7.3	กลาง
7.4 – 7.8	ด่างเล็กน้อย
7.9 – 8.4	ด่าง
8.5 – 9.0	ด่างแก่
> 9.0	ด่างแก่มาก

ที่มา: (United States Department of Agriculture, 1993)

### 2.4.8 การดูดซับบนพื้นผิวดิน (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสกับสารดูดซับ (Adsorbent) กลไกการดูดซับแบ่งได้ 2 ชนิด คือการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดขึ้นจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ซึ่งมีสมมติฐานของการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) และอนุภาคตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่บนผิวตัวดูดซับอย่างอิสระ ส่วนการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เกิดเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับ เช่น การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (Chen, 2015)

การดูดซับระหว่างสารดูดซับและตัวดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนเข้าสู่สมดุล ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ เรียกว่าไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับ

ของตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) และฟรุนดริชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) คือไอโซเทอมที่ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน โดยแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น รวมทั้งไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลซึ่งมีค่าความร้อนของการดูดซับและค่าพลังงานเท่ากันและคงที่

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์แสดงดังนี้

$$q_e = \frac{X}{M} = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$X$	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$M$	=	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)
	$q_m$	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$K_L$	=	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
	$C_e$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่หลังสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ฟรุนดริชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) คือไอโซเทอมที่ใช้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) การดูดซับที่เกิดขึ้นไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) ซึ่งมีค่าความร้อนของการดูดซับและค่าพลังงานไม่เท่ากัน การดูดซับเกิดขึ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมี

สมการการดูดซับแบบฟรุนดริชแสดงดังนี้

$$q_e = \frac{X}{M} = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$X$	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$M$	=	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

$C_e$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือนอยู่หลังสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$K_F$	=	ค่าคงที่ของฟรุนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อมิลลิกรัม) <sup>1/n</sup>
$n$	=	ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

ทั้งนี้ค่า  $1/n$  หรือความชันของกราฟสามารถใช้อธิบายการดูดซับได้ดังนี้  $1/n = 1$  หมายถึงไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่า  $1/n$  มากกว่า 1 หมายถึง พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากพอที่จะใช้ในการดูดซับ และค่า  $1/n$  น้อยกว่า 1 หมายถึง ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

ความสอดคล้องของสมการไอโซเทอมของการดูดซับสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด ซึ่งพิจารณาได้จากความใกล้เคียงระหว่างข้อมูลจากผลการทดลองและสมการเส้นตรงของไอโซเทอมแต่ละชนิด นอกจากนี้ความสอดคล้องของสมการไอโซเทอมยังสามารถพิจารณาได้จากค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ การคำนวณค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{(q_{e,e} - q_{e,m})^2}{q_{e,m}} \right\}$$

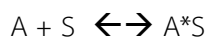
เมื่อ  $q_{e,e}$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_{e,m}$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ความเร็วในการดูดซับอธิบายได้จากสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetics) การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับบนดินตัวอย่างของงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) เป็นสมการที่ใช้ อธิบายอัตราเร็วในการดูดซับภายใต้สมมติฐานการดูดซับของตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้





เมื่อ	A	=	ตัวถูกดูดซับ
	S	=	ตัวดูดซับ
	A*S	=	สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ

โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนแสดงดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$k_1$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อชั่วโมง)
	t	=	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order) เป็นสมการที่ใช้อธิบายอัตราเร็วในการดูดซับภายใต้สมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



เมื่อ	A	=	ตัวถูกดูดซับ
	S	=	ตัวดูดซับ
	A*S <sub>2</sub>	=	สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ

โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนแสดงดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$k_2$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)
	t	=	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง ( $k_2$ ) และค่าความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเนตที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) สามารถใช้เพื่อคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ( $h$ ) และค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ ( $t_{1/2}$ ) ได้ดังนี้

อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ( $h$ ) (มิลลิกรัมต่อกรัม-ชั่วโมง)

$$h = k_2 q_e^2$$

ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ ( $t_{1/2}$ ) (ชั่วโมง)

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e}$$

ความสอดคล้องของสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับบนดินตัวอย่าง พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ใกล้เคียงหนึ่งและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งคำนวณได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดลองกับการคำนวณจากสมการ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$SD = \sqrt{\frac{\sum \left[ \frac{q_{t,exp} - q_{t,cal}}{q_{t,exp}} \right]^2}{n-1}}$$

เมื่อ  $q_{t,exp}$  = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

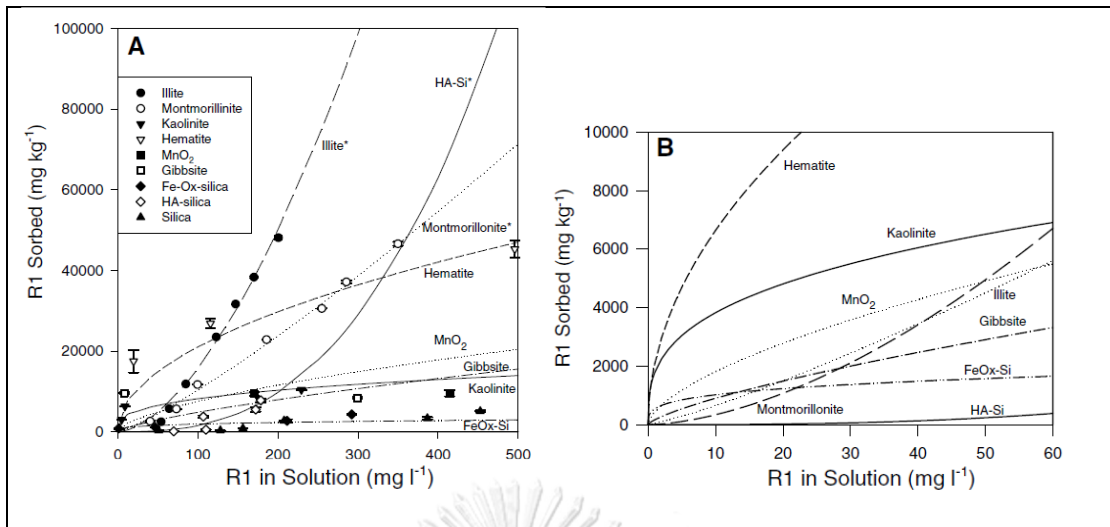
$q_{t,cal}$  = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$n$  = จำนวนจุดข้อมูล

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และ Mulligan (2004) ศึกษาการใช้โพลีเมอร์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดเพื่อกำจัดแคดเมียม (Cd) และนิกเกิล (Ni) จากดินทรายในคอลัมน์ที่มีปริมาตรรูพรุนร้อยละ 20 ผลการทดลองพบว่า สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดความเข้มข้นร้อยละ 0.5 สามารถกำจัดแคดเมียมและนิกเกิลได้ร้อยละ 73.2 และ 68.1 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดจะเริ่มตกตะกอนที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6 และกำจัดโลหะต่างๆ ออกจากดินปนเปื้อนได้ดีที่ค่าพีเอชเป็นเบส เนื่องจากที่ค่าพีเอชเป็นเบส แรมโนลิพิดมีแนวโน้มแตกตัวเป็นไอออนทำให้หมู่คาร์บอกซิลิกของแรมโนลิพิดมีความแรงของประจุมากขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าภาพร่างของแรมโนลิพิดเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช โดยเมื่อค่าพีเอชเป็นเบส สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Large aggregate) และมีไมเซลล์เกิดขึ้นด้วย ส่วนที่ค่าพีเอชเป็นกรดสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดมีลักษณะเป็นเวสสิเคิล (Vesicle)

Ochoa-Loza และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด R1 และ R2 บนดินที่มีองค์ประกอบของดินเหนียว ออกไซด์โลหะ และสารอินทรีย์ต่างๆ กัน ดินเหนียวที่ทำการศึกษาประกอบด้วย เคโอลิไนท์ อิลไลต์ และแคลเซียมมอนต์มอริลโลไนท์ ออกไซด์โลหะที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แมงกานีสไดออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) กิบบ์ไซต์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) และทรายซิลิกาเคลือบเหล็กออกไซด์ (FeOx-Si) สารอินทรีย์ที่ทำการศึกษาคือทรายซิลิกาเคลือบกรดฮิวมิก หลังการผสมดินแต่ละประเภทกับสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่อัตราส่วนดินต่อสารละลาย 1 ต่อ 2 น้ำหนักดินต่อสารล้างดิน เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า R1 ความเข้มข้นต่ำกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ดูดซับบนฮีมาไทต์ได้มากกว่าเคโอลิไนท์ แมงกานีสไดออกไซด์ อิลไลต์ แคลเซียมมอนต์มอริลโลไนท์ กิบบ์ไซต์ ทรายซิลิกาเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายซิลิกาเคลือบกรดฮิวมิกตามลำดับ ส่วนที่ R1 ความเข้มข้นสูงกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ดูดซับบนอิลไลต์ได้มากกว่าทรายซิลิกาเคลือบกรดฮิวมิก แคลเซียมมอนต์มอริลโลไนท์ ฮีมาไทต์ แมงกานีสไดออกไซด์ กิบบ์ไซต์ และเคโอลิไนท์ตามลำดับ การดูดซับของสารลดแรงตึงผิว R1 บนดินแต่ละประเภทแสดงดังภาพที่ 10 นอกจากนี้ยังพบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด R1 ผสม R2 ทำให้ R1 เกิดการดูดซับกับตัวกลางลดลงและมีแนวโน้มละลายอยู่ในภาพของสารละลายมากขึ้น



ภาพที่ 10 การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด R1 บนดินชนิดต่างๆ  
(Ochoa-Loza และคณะ, 2006)

Dahrazma และ Mulligan (2007) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากตะกอนดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดเป็นสารล้างดิน การทดลองใช้วิธีการชะดินผ่านคอลัมน์ที่มีอัตราการไหลต่อเนื่อง 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 วัน เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการใช้สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดในพื้นที่ปนเปื้อน (In-situ) ด้วยวิธีการชะดิน (Soil flushing) ตะกอนดินที่นำมาทดสอบมาจากคลองลาซิง ประเทศแคนาดา ซึ่งตั้งอยู่ในเขตพื้นที่อุตสาหกรรมโลหะและเหล็ก พบการปนเปื้อนทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) 140, 572 และ 4,854 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนสารล้างดินใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 ทั้งที่มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 และปราศจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยปราศจากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัด Cu Zn และ Ni ได้ร้อยละ 37, 13 และ 27 ตามลำดับ และการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 ช่วยให้การกำจัด Cu มีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เพียงอย่างเดียว

Satapanajaru และคณะ (2007) ศึกษาการใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนเพื่อกำจัดอาหาราซิน (Atrazine) ออกจากดินปนเปื้อน ผลการศึกษาพบว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโน (ZVI) มีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดอาหาราซินออกจากดินปนเปื้อน โดยสามารถกำจัดอาหาราซินได้ 30 มก./ล. เมื่อใช้ ZVI ร้อยละ 2 ของน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งนี้การใช้ ZVI มีผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้เป็น 2-ethyl-amino-4-isopropylamino-1,3,5-triazine เป็นผลให้ค่าพีเอชลดลงจาก 9 เหลือ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าตะกั่วสามารถทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาทำให้ระยะเวลาในการกำจัดอาหาราซินลดลงได้อีกด้วย ส่วนกรณีที่มีเฟอร์รัสและเฟอร์ริกปรากฏในระบบจะเป็นผลให้อัตราเร็วในการบำบัดลดลงดังนี้ Fe(III) ( $2.04 \text{ วัน}^{-1}$ ) > Fe(II) ( $1.79 \text{ วัน}^{-1}$ )

Wang และ Mulligan (2008) ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดในการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากทางแร่ปนเปื้อนอาร์เซนิกและโลหะหนักด้วยวิธีการชะดิน (Soil flushing) การทดลองใช้คอลัมน์เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการใช้สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดในพื้นที่ปนเปื้อน (In-situ) ด้วยวิธีการชะดิน (Soil flushing) ตัวอย่างทางแร่มาจากเมืองบาเทิร์สต์ ประเทศแคนาดา ซึ่งปนเปื้อนอาร์เซนิต (As(v)) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) โดยทางแร่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบร้อยละ 23.8 จากการทดลองพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่ค่าพีเอช 11 สามารถเพิ่มการกำจัดอาร์เซนิกและโลหะหนักออกจากทางแร่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อคอลัมน์มีปริมาตรรูพรุนร้อยละ 70 โดยกำจัดอาร์เซนิกได้ 148 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วน Cu Pb และ Zn ถูกกำจัด 74, 2,379 และ 259 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของอาร์เซนิก ทั้งนี้การคายการดูดซับของอาร์เซนิกและโลหะหนักต่างๆ มีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กที่พบในสารละลาย ซึ่งคาดการณ์ว่าสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดอาจมีส่วนช่วยให้อาร์เซนิกรวมตัวกับเหล็กผ่านกลไกสะพานเชื่อมโลหะ (Metal bridging mechanism) หรือรวมเข้ากับไมเซลล์ของแรมโนลิพิดเกิดเป็นสารประกอบละลายน้ำ

Wang และ Mulligan (2009) ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากทางแร่ปนเปื้อนด้วยวิธีการล้างดินแบบแบทช์ เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการใช้สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดนอกพื้นที่ปนเปื้อน (Ex-situ) ด้วยวิธีการล้างดิน (Soil washing) ตัวอย่างทางแร่มาจากเมืองบาเทิร์สต์ ประเทศแคนาดา สารล้างดินใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่อัตราส่วน 1 ต่อ 10 ทางแร่ต่อสารล้างดิน ใช้ความเข้มข้นของแรมโนลิพิดแตกต่างกันตั้งแต่ 25 ถึง 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดที่ค่าพีเอช 7, 9 และ 11 โดยนำสารผสมระหว่างดินและสารล้างดินต่างๆ ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 60 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาการล้างดิน 6, 12, 24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง แล้วแยกดินออกจากสารล้างดินด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด 10 มิลลิกรัมต่อทางแร่ 1 กรัม ที่ค่าพีเอช 11 สามารถกำจัดอาร์เซนิกได้มากที่สุดที่เวลาล้างดิน 24 ชั่วโมง หลัง 24 ชั่วโมง ปริมาณอาร์เซนิกที่กำจัดได้มีค่าคงที่ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าการล้างดินด้วยน้ำกลั่นที่มีค่าพีเอชเท่ากัน 21.6 เท่า จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการดูดซับของแรมโนลิพิดบนทางแร่เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้อาร์เซนิกเกิดการคายการดูดซับออกจากทางแร่ นอกจากนี้ยังพบว่าการคายการดูดซับของอาร์เซนิกสัมพันธ์โดยตรงกับการละลายของเหล็กและการคายการดูดซับของโลหะอื่นๆ ที่ปนเปื้อนในทางแร่ เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ซึ่งอาจเป็นอีกหนึ่งกลไกที่เพิ่มการกำจัดอาร์เซนิกออกจากทางแร่ เนื่องจากอาร์เซนิกรวมตัวกับโลหะและสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดเกิดเป็นสารประกอบละลายน้ำ

Torres, Lopez และ Beltran (2011) ศึกษาการกำจัดอาร์เซนิก (As) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ออกจากดินปนเปื้อนด้วยสารล้างดิน 13 ชนิด ประกอบด้วย สารลดแรงตึงผิว 12 ชนิด และน้ำเปล่า 1 ชนิด โดยใช้ดินปนเปื้อนจำนวน 6 กรัม ต่อสารล้างดิน 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 23 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า Cu, Ni และ Zn ถูกกำจัดได้ด้วย น้ำเปล่าประมาณร้อยละ 80 ซึ่งสารลดแรงตึงผิวไม่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักดังกล่าวแต่อย่างใด ส่วน แคดเมียมถูกกำจัดได้ดีที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ซึ่งมากกว่าการล้างด้วยน้ำเปล่าประมาณ 2 เท่า และอาร์เซนิกถูกกำจัดได้ดีที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว Polafix CAPB ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทที่มี ทั้งประจุบวกและลบ (Zwitterionics surfactant) โดยสามารถกำจัดอาร์เซนิกได้ประมาณร้อยละ 50 ซึ่ง มากกว่าการล้างด้วยน้ำเปล่าที่สามารถกำจัดอาร์เซนิกได้เพียงร้อยละ 10

เกษราพร สุอรุณ และ โกวิท ภัยพิวงศา (2012) ศึกษาการดูดซับไอออนเงินโดยใช้เรซินไคโตซาน เป็นตัวดูดซับ โดยทำการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ด้วยวิธีการไตเตรตด้วยกรด และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดลิชไอโซเทอม รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้ แบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือนและสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนเงินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น โดยการดูดซับไอออนเงินของเรซินไคโตซานสอดคล้องกับฟรุนดลิชไอโซเทอมและสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา อันดับที่สองเหมือน โดยเรซินไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินเท่ากับ 22.8 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับเท่ากับ 8.6 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาทึ

ฉันทพร พรหมราช, พิสิษฐ์ เจริญสุดใจ และสุรเดช พลเสน (2014) ศึกษาการดูดซับอาร์เซนิกในดินปนเปื้อนจากท้ายเหมืองแร่ จังหวัดเลย โดยใช้หญ้ากีนีสีม่วง ทำการศึกษาการสะสมอาร์เซนิกในต้นและใบ และราก เพื่อเปรียบเทียบกับดินสังเคราะห์ที่ทำให้ปนเปื้อนอาร์เซนิตโดยมีระดับความปนเปื้อน เท่ากับ 0, 50, 100, 150 และ 200 มก./กก. ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ผลการศึกษา พบว่า หญ้ากีนีสีม่วงสามารถมีชีวิตอยู่รอดได้ตลอด 90 วัน ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนิกต่ำกว่า 50 มก./กก. โดยอาร์เซนิกจะสะสมอยู่ในรากมากกว่าต้นและใบ ส่วนกรณีที่น่าไปปลูกในดินปนเปื้อนจากท้ายเหมืองแร่ จังหวัดเลย ซึ่งมีปริมาณอาร์เซนิกปนเปื้อน 153.02 มก./กก. พบว่าสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีการสะสมสารหนูในส่วนรากมากที่สุดเช่นกัน

Cao และคณะ (2015) ศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนิกโดยใช้ออกซาลेटเป็นสารล้างดิน จากนั้นกำจัดอาร์เซนิกออกจากสารล้างดินด้วยการเติมอากาศร่วมกับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero-valent iron: ZVI) ในการศึกษาที่ผู้วิจัยเตรียมเคโอลินปนเปื้อนอาร์เซนิกโดยการผสมเคโอลินต่อสารละลายอาร์เซนิกที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4 ของสารละลายต่อน้ำหนักดิน พบว่าสารออกซาลेटความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรสามารถกำจัดอาร์เซนิกออกจากเคโอลินและดินปนเปื้อนของจริงได้ ร้อยละ 83.7 และ 52.6 ตามลำดับ ส่วนการ

กำจัดอาร์เซนิกออกจากสารล้างดินพบว่าอาร์เซนิกมีแนวโน้มดูดซับกับเหล็กไฮดรอกไซด์เป็นผลให้อาร์เซนิกในสารล้างดินถูกกำจัดประมาณร้อยละ 94.9 ภายในเวลา 120 นาที

Im และคณะ (2015) ศึกษาผลของสารล้างดินที่ใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากดินต่อ การเพาะปลูกเมล็ดมันฝรั่งดินเดียวในดินที่ผ่านการบำบัด ซึ่งดินปนเปื้อนนำมาจากบริเวณโรงงานหลอมโลหะ เมืองจิ้งฮิง ประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งพบการปนเปื้อน ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และอาร์เซนิก (As) ความเข้มข้น 97, 0.5, 52, 89 และ 59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สารล้างดิน 4 ชนิด ประกอบด้วย กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อ ลิตร โซเดียมไดทไอนท์ความเข้มข้นร้อยละ 2 ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร และ ฟอสเฟส โดยใช้อัตราส่วนดินต่อสารละลาย 1 ต่อ 5 กรัมต่อมิลลิลิตร ใช้เวลาในการล้างดิน 1 ชั่วโมง ด้วย เครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที พบว่าสารล้างดินทั้ง 4 ชนิดสามารถกำจัดอาร์เซนิกได้ร้อยละ 35 ถึง 60 โดยกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร กำจัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 60 จากนั้น นำดินที่ผ่านการล้างดินแล้วไปทดสอบประสิทธิภาพในการเพาะปลูกโดยใช้เมล็ดมันฝรั่งดินเดียว พบว่าดินที่ ผ่านการล้างด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด มีผลให้อัตราการงอกของเมล็ดลดลงต่ำกว่าดินเดิม โดยดินที่ล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกไม่พบการงอกของเมล็ดเลย ส่วนการเจริญเติบโตหลังเพาะเมล็ด 14 วัน วัดด้วยความสูงพบว่าดินที่ล้างด้วยสารล้างดินอีก 3 ชนิด พบการเจริญเติบโตของต้นมันฝรั่งดินเดียวเพียง 2 มิลลิเมตร เทียบกับดินเดิมที่มีความสูงต้นมันฝรั่งดินเดียว 18 เซนติเมตร จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สารล้างดินทั้ง 4 ชนิด มีศักยภาพในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากดินปนเปื้อน แต่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อ สมบัติของดินในการเพาะปลูก ดังนั้นแล้วสารล้างดินทั้ง 4 ชนิดนี้ จึงไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ บำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนิกที่มีวัตถุประสงค์เพื่อนำดินกลับไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรม

Liang, Wang และ Peng (2015) ศึกษาการคงอยู่และการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิกในสารลดแรงตึง ผิวประจุลบและสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่ใช้ศึกษาคือโซเดียมโดดีซิลเบนซีน ซัลโฟเนต (SDBS) และสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุที่ใช้ศึกษาคือโพลีเอทิลีนไกลคอลอัลคิลออลิฟีน (Triton X-100) โดยศึกษาการดูดซับของอาร์เซนิกบนเม็ดทรายเคลือบเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (FH) ผลการศึกษาพบว่าการใส่ สารลดแรงตึงผิว SDBS และ Triton X-100 พร้อมอาร์เซนิก ทำให้อาร์เซนิกดูดซับบน FH ได้ลดลงร้อยละ 29.7 และอัตราเร็วในการดูดซับช้าลงร้อยละ 52.3 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อชะ FH ที่ดูดซับอาร์เซนิกไว้ด้วย สารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดผ่านคอลัมน์จะทำให้อาร์เซนิกในภาพอาร์เซนิก (As(III)) และอาร์เซนิต (As(V)) คายการดูดซับได้ร้อยละ 36.0 และ 10.8 ซึ่งสรุปได้ว่าอาร์เซนิกสามารถดูดซับได้ดีกับตัวกลางที่มี องค์ประกอบของเหล็กโดยเฉพาะอาร์เซนิกในภาพของอาร์เซนิต (As(V)) ดังนั้นแล้วการใช้สารลดแรงตึงผิว SDBS และ Triton X-100 เป็นสารล้างดินในการกำจัดอาร์เซนิตออกจากดินปนเปื้อนที่มีเหล็กเป็น องค์ประกอบหลักจึงไม่มีความเหมาะสม

Liao, Li และ Yan (2015) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักและอาร์เซนิกออกจากดินปนเปื้อนโดยการคัดแยกขนาดร่วมกับกระบวนการล้างดินแบบแบทช์ ดินตัวอย่างนำมาจากมลพิษหุนาน ประเทศจีน การทดลองแยกดินออกเป็น 5 ขนาด ได้แก่ ขนาดเล็กกว่า 0.053 มิลลิเมตร ขนาด 0.053 ถึง 0.10 มิลลิเมตร ขนาด 0.10 ถึง 0.25 มิลลิเมตร ขนาด 0.25 ถึง 1.0 มิลลิเมตร ขนาด 1.0 ถึง 2.0 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร สารล้างดินใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิทความเข้มข้นร้อยละ 1.0 ในกรดไฮโดรคลอริก 2.0 โมลต่อลิตร โดยมีอัตราส่วนดินต่อสารล้างดินที่ 1 ต่อ 10 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นแยกสารล้างดินออกจากดินด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน แล้ววัดปริมาณโลหะหนักและอาร์เซนิกที่กำจัดได้ด้วยเครื่อง ICP-OES ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาการล้างดินประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.053 มิลลิเมตร เนื่องจากเกิดการดูดซับอีกครั้งกับดินเหนียว สำหรับดินที่มีขนาดต่างๆ กัน ตะกั่วและแคดเมียมถูกกำจัดได้ร้อยละ 75 ถึง 87 และสังกะสีและทองแดงถูกกำจัดได้ร้อยละ 61 ถึง 77 ตามลำดับ ส่วนอาร์เซนิกและโครเมียมถูกกำจัดได้น้อยกว่าร้อยละ 45 ขนาดดินที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนสูงสุดคือขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโลหะหนักและอาร์เซนิกที่ถูกกำจัดมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กแมงกานีสและแคลเซียม



## 2.6 สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (Rhamnolipids) ร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์เพื่อกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อนอาร์เซนเตต โดยดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินเกรดวิเคราะห์ 2 ประเภท ได้แก่ ดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์ (Kaolinite) และดินทรายประเภททรายซิลิกา (Silica sand) ซึ่งเป็นดินประเภทเดียวกับดินที่พบในพื้นที่ปนเปื้อนอาร์เซนิกในเมืองไทย รวมทั้งความเข้มข้นของอาร์เซนเตตที่ปนเปื้อนในดินที่ทำการศึกษาก็เป็นความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงของการปนเปื้อนจริงเช่นเดียวกัน วิธีการกำจัดสารปนเปื้อนในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการล้างดินแบบแบทช์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดสามารถกำจัดอาร์เซนิกออกจากตัวกลางที่ปนเปื้อนได้ดีทั้งตัวกลางที่เป็นดินหรือหางแร่ โดยพบว่าการคายการดูดซับของอาร์เซนิกและโลหะหนักต่างๆ มีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กและโลหะอื่นๆ ซึ่งสันนิษฐานว่าสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดอาจมีส่วนช่วยให้อาร์เซนิกรวมตัวกับเหล็กผ่านกลไกสะพานเชื่อมโลหะ (Metal bridging mechanism) หรือรวมเข้ากับไมเซลล์ของแรมโนลิพิดเกิดเป็นสารประกอบละลายน้ำ ทั้งนี้ผู้วิจัยก่อนหน้านี้ไม่ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันถึงความสัมพันธ์ของเหล็กที่มีอยู่ในสารล้างดินต่อการกำจัดอาร์เซนิกด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด

วิธีการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนิกผู้วิจัยก่อนหน้านี้เตรียมเคโอลินปนเปื้อนอาร์เซนิกโดยการผสมเคโอลินต่อสารละลายอาร์เซนิกที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4 ของสารละลายต่อน้ำหนักดิน ซึ่งพบว่าวิธีการดังกล่าวนี้สามารถเตรียมเคโอลินปนเปื้อนอาร์เซนิกได้ ยืนยันโดยใช้น้ำเปล่าล้างดินที่เตรียมไว้ และพบว่ามีอาร์เซนิกในน้ำเปล่าเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้เตรียมเคโอลินปนเปื้อนอาร์เซนิกโดยการผสมเคโอลินต่อสารละลายอาร์เซนิกที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ของสารละลายต่อน้ำหนักดิน เนื่องจากดินเหนียวเคโอลิไนท์จะสามารถสัมผัสกับสารละลายได้อย่างทั่วถึงมากกว่า

การเลือกใช้อัตราส่วนดินต่อสารล้าง งานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่พบผลกระทบของอัตราส่วนดินต่อสารล้างดินหากดินมีการผสมกับสารล้างดินอย่างทั่วถึง โดยการทดลองที่ผ่านมาใช้อัตราส่วนดินต่อสารละลายตั้งแต่ 1:3.5 ถึง 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยทำการผสมด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วตั้งแต่ 30 รอบต่อนาทีถึง 200 รอบต่อนาที สำหรับการแยกสารล้างดินออกจากดินใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ร่วมกับการใช้ตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน สามารถแยกดินออกจากสารล้างดินได้โดยสมบูรณ์ ทั้งนี้ขนาดของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดทั้งในสภาพที่เป็นกรดและเบสมิขนาดเล็กลงเพียงพอที่จะสามารถผ่านช่องว่างขนาด 200 นาโนเมตร หรือ 0.2 ไมครอนได้ และสารประกอบของแรมโนลิพิดและโลหะไม่มีผลต่อขนาดแรมโนลิพิดแต่อย่างใด ดังนั้นแล้วการกรองด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอนจึงสามารถแยกสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดและอาร์เซนิกออกจากดินได้ และค่าพีเอชเท่ากับ 11 ของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดเป็นค่าพีเอชที่ดีที่สุดที่จะใช้เป็นสารล้างดินเพื่อกำจัดอาร์เซนิก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระยะเวลาในการล้างดินด้วยแรมโนลิพิด 24 ชั่วโมง เพียงพอให้การคาย การดูดซับของอาร์เซนิกเข้าสู่สมดุล และสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของแรมโนลิพิดพบว่า ระยะเวลาในการผสมดินกับสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด 72 ชั่วโมงนั้นมากเพียงพอที่จะใช้เป็นเวลาตัวแทน การดูดซับที่เข้าสู่สมดุลของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด นั้นแล้วในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวลาศึกษาการดูดซับ ของอาร์เซนิกและแรมโนลิพิด 96 ชั่วโมง และศึกษาระยะเวลาในการล้างดิน 24 ชั่วโมง



### บทที่ 3

#### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (Rhamnolipids) ร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์เพื่อกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อนอาร์เซนต โดยดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินเกรตวิเคราะห์จำนวน 2 ประเภท ได้แก่ ดินเหนียวประเภทเคโอลิไนท์ (Kaolinite) และดินทรายประเภททรายซิลิกา (Silica sand) ซึ่งถูกทำให้ปนเปื้อนเทียมด้วยการผสมดินกับสารละลายโซเดียมอาร์เซนต-ไดเบสิกเฮปตาไฮเดรต โดยวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนใช้วิธีการล้างดินแบบแบทช์ ซึ่งวิธีการบำบัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวนี้ เป็นหนึ่งในวิธีการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อนโดยถาวร สำหรับการทดลองดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ในส่วนของการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 บางส่วนนั้น ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 3 ตึก 14 ภาควิชาวิศวกรรมเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และการทดลองอื่นๆ ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลองดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การเตรียมดินทดลองเบื้องต้น การศึกษาการดูดซับอาร์เซนตบนดินตัวอย่าง การทดสอบลักษณะทางกายและทางเคมีของดินตัวอย่าง

การทดลองช่วงที่ 2 ขั้นตอนการศึกษาสารล้างดิน แบ่งการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่าง และการทดสอบการตกตะกอนของสารล้างดิน

การทดลองช่วงที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน ประกอบไปด้วย การเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนต การเตรียมสารล้างดิน และการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน

ทั้งนี้แผนการดำเนินการทดลองแสดงดังภาพที่ 11 และตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 11 แผนการดำเนินการทดลอง

ตารางที่ 6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัย

ตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณแรมโนลิทิด</li> <li>- ปริมาณเฟอริกคลอไรด์</li> <li>- ระยะเวลาในการล้างดิน</li> </ul>
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณอาร์เซนตที่ถูกกำจัด</li> </ul>
ตัวแปรคงที่	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณดิน</li> <li>- สัดส่วนปริมาณดินต่อปริมาณสารล้างดิน</li> <li>- อุณหภูมิห้อง</li> <li>- ค่าพีเอช</li> <li>- ความเร็วรอบการเขย่าของเครื่องเขย่า</li> <li>- ความเร็วรอบการเหวี่ยงและเวลาของเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง</li> </ul>

## 3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดทดลองเซนต์ปีฟวีก์ (Polypropylene centrifuge tube) ขนาด 15 มิลลิลิตร
- 2) หลอดทดลองเซนต์ปีฟวีก์ (Polypropylene centrifuge tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3) ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (Test tube rack)
- 4) แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- 5) ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 20 – 200 ไมโครลิตร บริษัทไปโอฮิต
- 6) ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 200 – 1,000 ไมโครลิตร บริษัทไปโอฮิต
- 7) ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 1,000 – 5,000 ไมโครลิตร บริษัทไปโอฮิต
- 8) ไมโครปิเปตทิว (Micropipette tips)
- 9) ปิเปต (Pipette) ขนาด 1 มิลลิลิตร
- 10) ปิเปต (Pipette) ขนาด 5 มิลลิลิตร
- 11) ปิเปต (Pipette) ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 12) บีกเกอร์ (Beaker) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 13) บีกเกอร์ (Beaker) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 14) บีกเกอร์ (Beaker) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 15) บีกเกอร์ (Beaker) ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- 16) บีกเกอร์ (Beaker) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- 17) กระบอกตวง (Cylinder) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 18) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 19) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 20) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 21) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- 22) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- 23) กระบอกฉีดยา (Syringe) ขนาด 50 มิลลิลิตร บริษัทเทอร์โมเม
- 24) ตู้อบ (Oven) รุ่น ดีวี 400 บริษัทยามาโตะ
- 25) ถ้วยเซรามิก (Ceramic plate)
- 26) ครกและสาก (Mortar and pestle)
- 27) ตะแกรง (Sieve)
- 28) คีมหนีบ (Forceps)
- 29) ตัวกรองเข็มฉีดยา ขนาด 0.45 ไมครอน (0.45  $\mu\text{m}$  PTFE non-sterile disposable syringe filter) บริษัทแอดวานซ์เทค จำกัด

- 30) เทอร์มิเตอร์ (Thermometer)
- 31) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 32) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance meter) รุ่นตราก้อน  
204 บริษัทเมทเลอร์ โทเลโด
- 33) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 34) เตาเผา (Furnace) รุ่นเคดีเอฟ เอส 70 บริษัทเคดีเอฟ เด็นเค็น ไฮเดินทอล
- 35) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่นสตาร์ทเตอร์ 300 บริษัทออ-ออส
- 36) เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่นรีซีโพร เซคเกอร์ เอสอาร์ 1 บริษัทไทเทค
- 37) เครื่องผสมสาร (Vortex mixer) บริษัทบรานสตีต อินเตอร์เนชันแนล
- 38) เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) รุ่นแม็ก-มิกเซอร์ เอ็ม 41  
บริษัทยามาโตะ
- 39) เครื่องไมโครเวฟ (Microwave) รุ่นอีทรอส เซล บริษัทไมน์ส์โตน
- 40) เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (BET) รุ่นเบลซอร์พ 2  
บริษัทไมโครเทค-เบล
- 41) เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) รุ่นยูนิเวอร์ซัล 32 บริษัทเฮททิซ
- 42) เครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer)  
รุ่นทีเอ็นเอ็ม-แอล บริษัทซิมัดซู
- 43) เครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) รุ่นอัลติมา 2 บริษัทโฮริบะ  
โจบิน ยิวอน

### 3.2.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสารเคมีเกรดการวิเคราะห์ทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ดินเหนียวเคโอลิไนท์ บริษัทชิกมา-อัลดริช
- 2) ดินทรายซิลิกา บริษัทชิกมา-อัลดริช
- 3) แร่โมลิบดี ความบริสุทธิ์ร้อยละ 90 บริษัทเอจีเออี เทคโนโลยี
- 4) เพอร์ริกคลอไรด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 บริษัทชิกมา-อัลดริช
- 5) โซเดียมอาร์เซนเต-ไดเบสิก เฮปตาไฮเดรต ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98  
บริษัทชิกมา-อัลดริช
- 6) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล บริษัทวาโค เพียว เคมีคอล  
อินดัสทรี จำกัด
- 7) ไฮโดรคลอริก บริษัทวาโค เพียว เคมีคอล อินดัสทรี จำกัด
- 8) โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัทวาโค เพียว เคมีคอล อินดัสทรี จำกัด
- 9) โซเดียมคลอไรด์ บริษัทวาโค เพียว เคมีคอล อินดัสทรี จำกัด

- 10) กรดไนตริก ความเข้มข้นร้อยละ 65 โดยมวล บริษัทควอลิตี้ รีเอเนต์ เคมีคอล
- 11) สารมาตรฐานคาร์บอน บริษัทแอกคิวิท์ สแตนดาร์ด
- 12) สารมาตรฐานเหล็ก บริษัทแอกคิวิท์ สแตนดาร์ด
- 13) สารมาตรฐานสารหนู บริษัทแอกคิวิท์ สแตนดาร์ด
- 14) ก๊าซอาร์กอน บริษัทไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด
- 15) ก๊าซออกซิเจน บริษัทไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด
- 16) ก๊าซไนโตรเจน บริษัทไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด

สูตรเคมีและมวลโมเลกุลของสารหลักที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย อันประกอบด้วยสารล้างดิน ดินตัวอย่างและสารปนเปื้อน แสดงดังตารางที่ 7

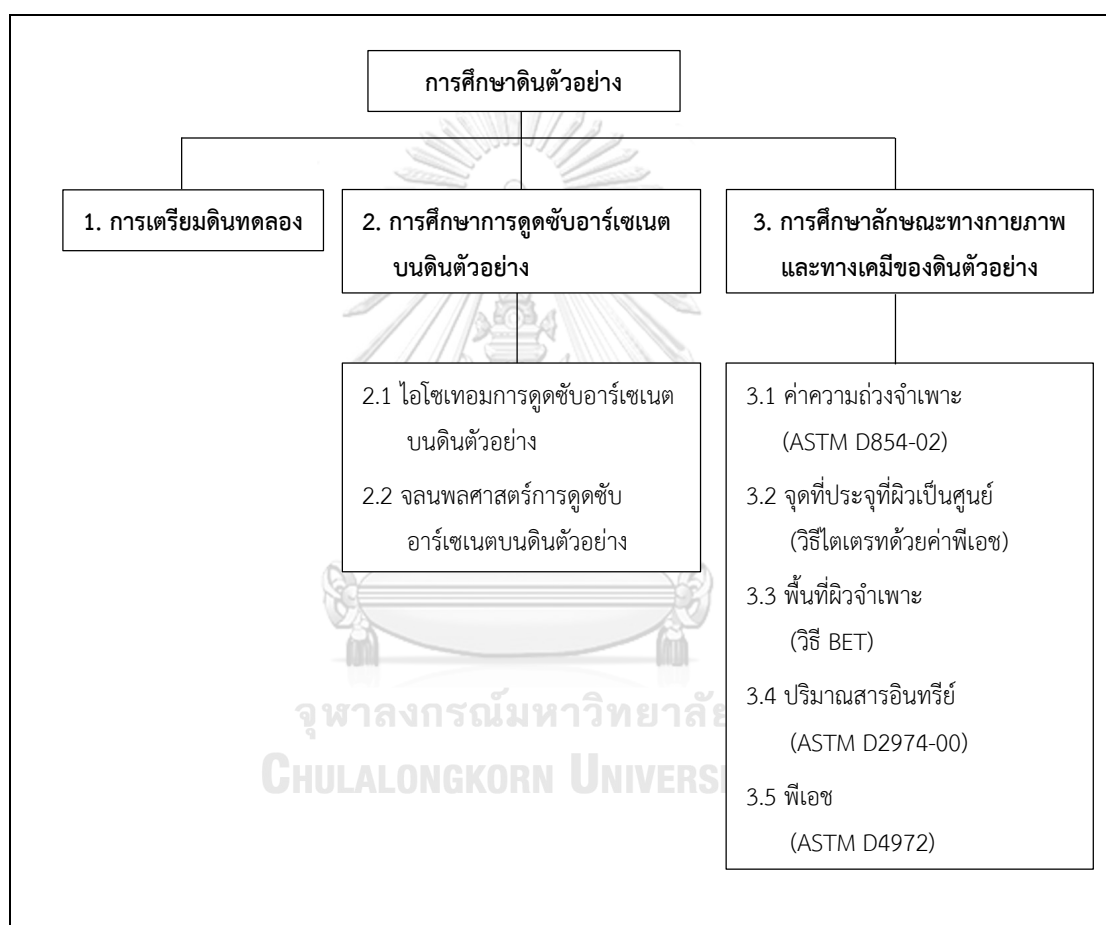
ตารางที่ 7 สูตรเคมีและมวลโมเลกุลของสารหลักที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

สารเคมี	สูตรเคมี	น้ำหนักโมเลกุล
<b>สารล้างดิน</b>		
- แรมโนลิพิด R1 (Rhamnolipids R1)	$C_{26}H_{48}O_9$	504.6
- แรมโนลิพิด R2 (Rhamnolipids R2)	$C_{32}H_{58}O_{13}$	650.8
- เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride)	$FeCl_3$	162.2
<b>ดิน</b>		
- เคโอลินท์ (Kaolinite)	$Al_2O_3 \cdot Si_2 \cdot 2H_2O$	258.16
- ทรายซิลิกา (Silica Sand)	$SiO_2$	60.08
<b>สารปนเปื้อน</b>		
- โซเดียมอาร์เซเนต-ไดเบสิก เฮปตาไฮเดรต (Sodium Arsenate Dibasic Heptahydrate)	$Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$	312.01

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 : ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง

การทดลองช่วงที่ 1 คือการศึกษาดินตัวอย่างทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ ดินเหนียวเคโอลิไนท์ และดินทรายซิลิกาที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับอาร์เซนิต ทั้งนี้ในการทดลองช่วงที่ 1 แบ่งออกเป็นสามขั้นตอน คือ การเตรียมดินทดลองเบื้องต้น การศึกษาการดูดซับของอาร์เซนิตบนดินตัวอย่าง และการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่าง แผนผังการศึกษาดินตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 12



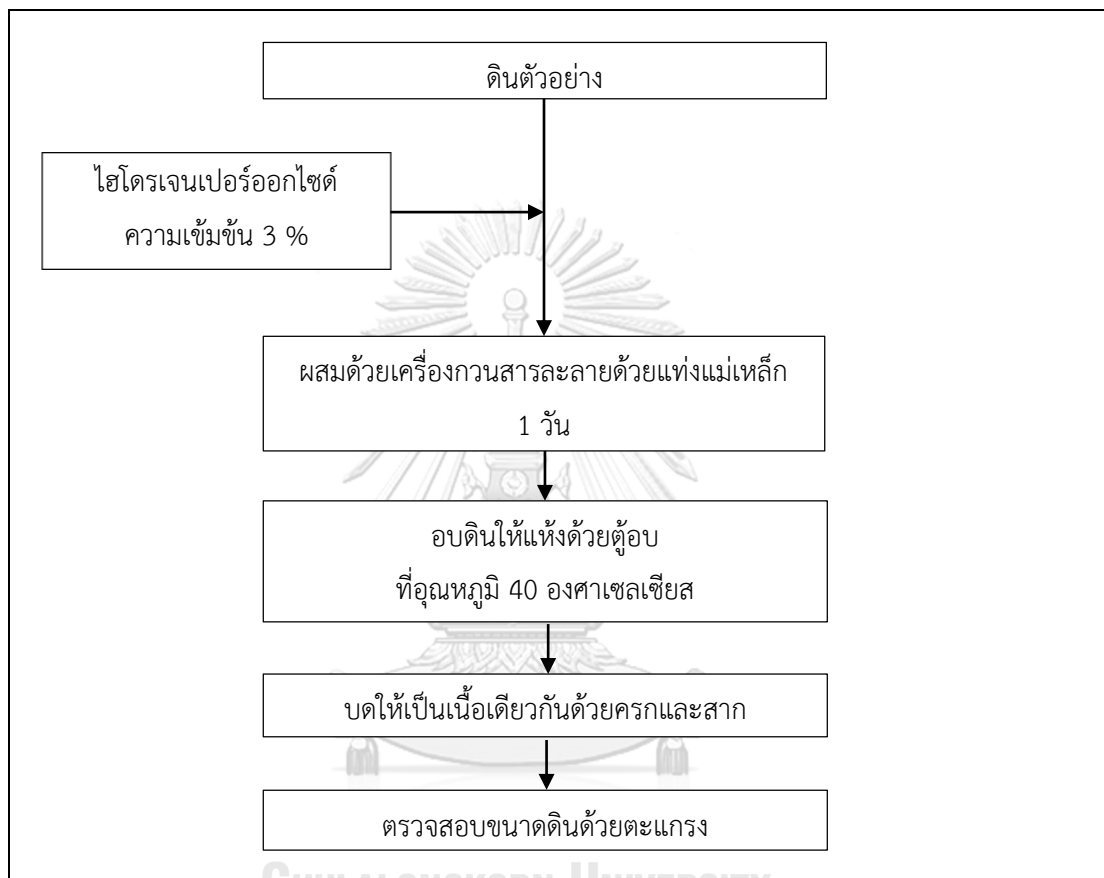
ภาพที่ 12 แผนผังการศึกษาดินตัวอย่าง

#### 1) การเตรียมดินทดลองเบื้องต้น

การเตรียมดินตัวอย่างเบื้องต้นนี้เป็นการเตรียมดินเพื่อใช้ในการทดลองทั้งหมดทั้งดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาโดยมีขั้นตอนในการเตรียมดินทดลองเบื้องต้นแสดงดังภาพที่ 13 โดยนำดินไปล้างด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ (Fortner และคณะ, 2011) ด้วยเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยครกและสาก แล้วจึงนำมาคัดแยกขนาดเม็ดดินโดยใช้



ตะแกรงเพื่อตรวจสอบขนาดเม็ดดินและนำข้อมูลขนาดเม็ดดินที่ได้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของผู้ผลิต นอกจากนี้ก่อนการเตรียมดินทดลองด้วยการล้างดินด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำการวัดค่าพีเอชดินและ ปริมาณสารอินทรีย์ในดินด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D4972 (ASTM international, 2010c) และ ASTM D2974-00 (ASTM international, 2010b) ตามลำดับ เพื่อสังเกตความแตกต่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการล้างดินด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



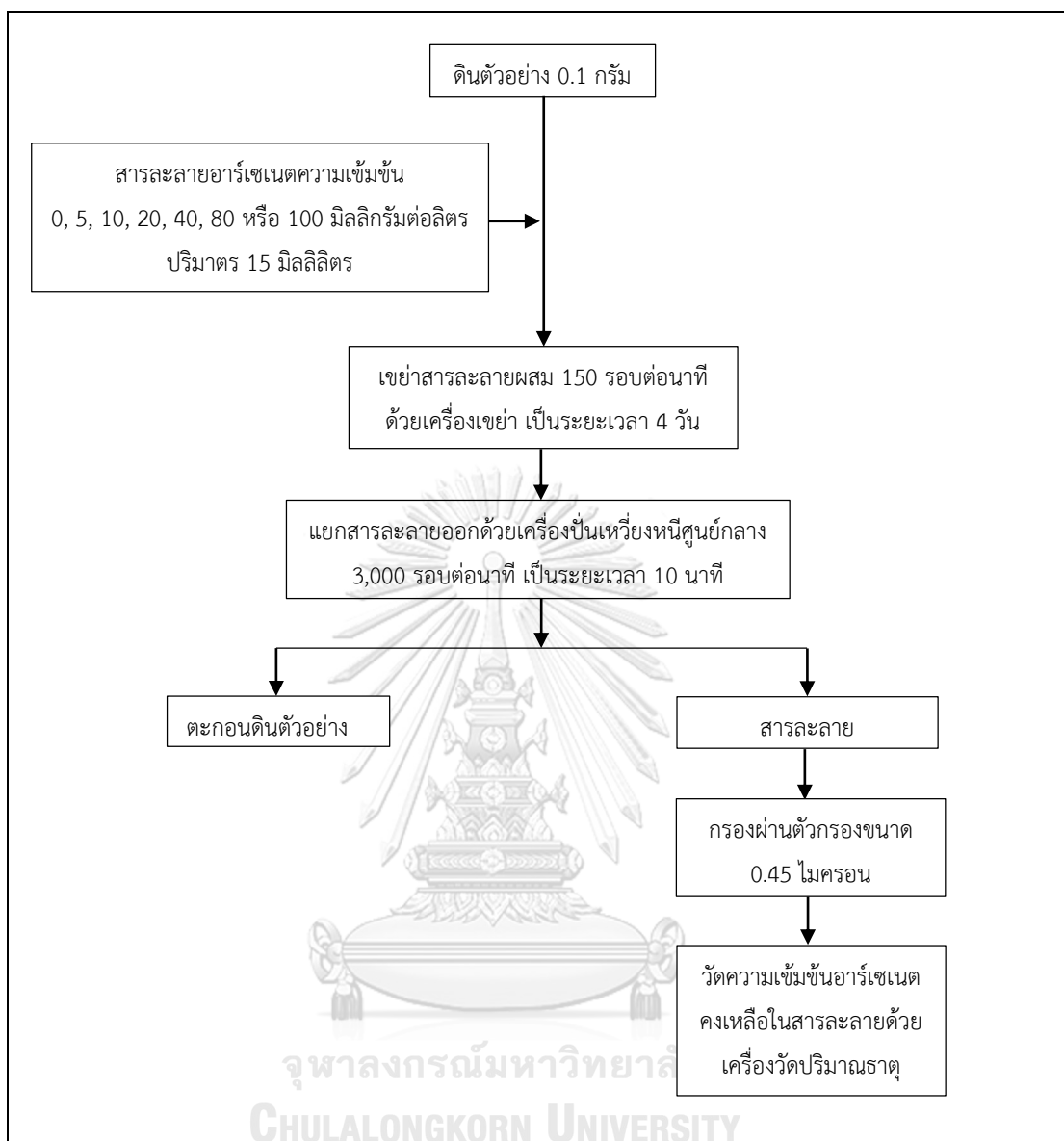
ภาพที่ 13 แผนภาพการเตรียมดินทดลองเบื้องต้น

## 2) การศึกษาการดูดซับของอาร์เซนบนดินตัวอย่าง

### 2.1) ไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์การดูดซับที่สภาวะสมดุล โดยสมการไอโซเทอมที่ใช้ศึกษาการดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่างประกอบด้วย แลงเมียร์ไอโซเทอม และฟรุนดริชไอโซเทอม ทั้งนี้ขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 14 โดยขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่างนี้ดำเนินการตามการศึกษาของเกษราพร สุอรุณ และ โกวิทป์ ปิยะมังคลา (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทป์ ปิยะมังคลา, 2555) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- นำดินจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในหลอดพลาสติกชนิดซิฟว์ขนาด 15 มิลลิเมตร จำนวนทั้งสิ้น 42 หลอด แบ่งเป็นดินเหนียวเคโอลิไนท์ 21 หลอด และดินทรายซิลิกา 21 หลอด
- ใส่สารละลายอาร์เซนเตด 15 มิลลิเมตร ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน 7 ความเข้มข้น ดังนี้ 0, 5, 10, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อความเข้มข้นลงในหลอดพลาสติกชนิดซิฟว์ที่มีดินตัวอย่างใส่ไว้แล้ว
- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 วัน
- เมื่อเขย่าครบ 4 วัน นำตัวอย่างมาแยกสารละลายอาร์เซนเตดออกจากดินโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองเอาเฉพาะสารละลายอาร์เซนเตดออกด้วยหลอดฉีดยาและตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน
- สารละลายอาร์เซนเตดที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนเตดที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) ซึ่งการวัดเป็นไปตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5673 – 05 (ASTM international, 2010d) ซึ่งแนะนำความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องวัดปริมาณธาตุสามารถวัดความเข้มข้นอาร์เซนิกได้เท่ากับ 0.9 ไมโครกรัมต่อลิตร
- นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแต่ละค่าความเข้มข้นและศึกษาไอโซโทมการดูดซับที่เหมาะสมของดินแต่ละประเภท โดยสมการไอโซโทมที่ใช้ในการวิเคราะห์การดูดซับของอาร์เซนเตดบนดินตัวอย่างประกอบด้วยแลงเมียร์ไอโซโทมและฟรุนดริชไอโซโทม

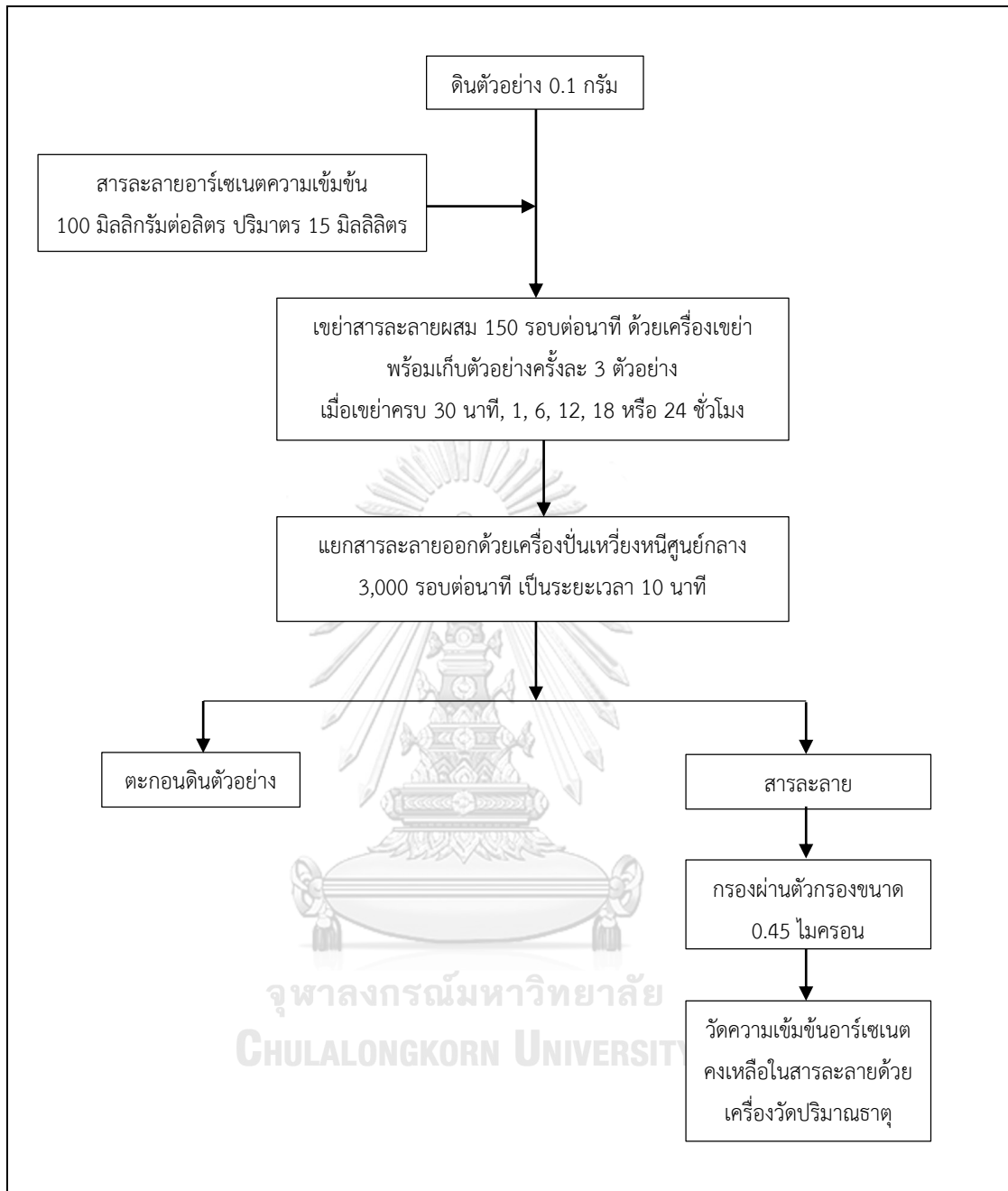


ภาพที่ 14 แผนภาพการศึกษาไอโซโทมการดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง

## 2.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 15 การศึกษาใช้สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order) ในการอธิบายความเร็วในการดูดซับอาร์เซนของดินตัวอย่าง โดยขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่างนี้ดำเนินการตามการศึกษาของ เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทท์ ปิยะมั่งคลา (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทท์ ปิยะมั่งคลา, 2555) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- เตรียมสารละลายอาร์เซนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ผสมดินตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม กับสารละลายอาร์เซนต่อปริมาตร 15 มิลลิตร ในหลอดพลาสติกชนิดพีวีซีขนาด 15 มิลลิตร จำนวนทั้งสิ้น 36 หลอด แบ่งเป็นดินเหนียวเคโอลิไนท์ 18 หลอด และดินทรายซิลิกา 18 หลอด
- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาอย่างละ 3 หลอด เมื่อเขย่าครบตามเวลา 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง
- แยกสารละลายอาร์เซนออกจากดินโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองเอาเฉพาะสารละลายอาร์เซนออกมาด้วยหลอดฉีดยาและตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน
- สารละลายอาร์เซนที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) ซึ่งการวัดเป็นไปตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5673 – 05 (ASTM international, 2010d) โดยวิธีมาตรฐานดังกล่าวได้แนะนำความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องวัดปริมาณธาตุสามารถวัดความเข้มข้นอาร์เซนิกได้เท่ากับ 0.9 ไมโครกรัมต่อลิตร
- นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเวลาการเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกันและวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนของดินแต่ละประเภท โดยใช้สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order) ในการอธิบายความเร็วในการดูดซับอาร์เซนของดินตัวอย่าง



ภาพที่ 15 แผนภาพการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนิตบนดินตัวอย่าง

### 3) การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่าง

#### 3.1) ค่าความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของดินตัวอย่างสามารถวัดได้โดยวิธีมาตรฐานการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดินโดยใช้ขวดพิกโนมิเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานตาม ASTM D854-02 (ASTM international, 2010a) วิธีการทดสอบนี้ครอบคลุมการทดสอบดินที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (No.4 Sieve) โดยตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบต้องเป็นดินแห้งและมีขนาดดินเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร ปริมาณดินที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 8 ทั้งนี้ในกรณีที่ไม่มีขวดพิกโนมิเตอร์สามารถใช้ขวดภาพชมพูหรือขวดวัดปริมาตรแทนได้

ตารางที่ 8 ปริมาณดินที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

ประเภทดิน	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม) เมื่อใช้พิกโนมิเตอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม) เมื่อใช้พิกโนมิเตอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
	SP,SP-SM	60 ± 10
SP-SC,SM,SC	45 ± 10	75 ± 10
Silt or Clay	35 ± 5	50 ± 10

ที่มา: (ASTM international, 2010a)

การศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของดินมีขั้นตอนดังนี้

- ทำการสอบเทียบพิกโนมิเตอร์โดยนำพิกโนมิเตอร์ที่แห้งสนิทและสะอาดไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง จำนวน 5 ครั้ง บันทึกน้ำหนักเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.02 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในขวดพิกโนมิเตอร์ซึ่งต้องระวังไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ในน้ำ โดยอาจใช้วิธีการต้มน้ำไล่ฟองอากาศหรือใช้แรงดูดสุญญากาศ (Vacuum) ควบคุมกับการใช้ความร้อนแล้วจึงปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเป็นอุณหภูมิห้อง วัดอุณหภูมิ น้ำกลั่นบันทึกเป็น  $T_C$  (องศาเซลเซียส) ปิดฝาขวดและชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็น  $M_{pw,c}$  (กรัม)
  - เติมน้ำกลั่นทิ้ง อบอุ่นให้แห้ง
  - ใส่ตัวอย่างดินลงในขวดพิกโนมิเตอร์ ปิดฝาขวดและชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น  $M_{p,s}$  กรัม
  - เติมน้ำกลั่นและบันทึกอุณหภูมิของน้ำกลั่นเป็น  $T$  (องศาเซลเซียส) และปิดฝาขวดชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น  $M_{pws,t}$
  - ดำเนินการทดลองซ้ำจำนวนตัวอย่างดินละ 3 อุณหภูมิ และใช้ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นค่าตัวแทนของดินแต่ละประเภท

- คำนวณหาความถ่วงจำเพาะของดินตามสมการดังนี้

#### ปริมาตรสอบเทียบของขวดพิกโนมิเตอร์

$$V_p = \frac{(M_{pw,c} - M_p)}{\rho_{w,c}}$$

- เมื่อ  $V_p$  = ปริมาตรสอบเทียบของขวดพิกโนมิเตอร์ (มิลลิลิตร)  
 $M_{pw,c}$  = น้ำหนักของพิกโนมิเตอร์และน้ำกลั่นที่อุณหภูมิสอบเทียบ (กรัม)  
 $M_p$  = น้ำหนักเฉลี่ยของพิกโนมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ (กรัม)  
 $\rho_{w,c}$  = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิสอบเทียบ (กรัมต่อมิลลิลิตร)

#### ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิทดสอบ

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))}$$

- เมื่อ  $G_t$  = ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิทดสอบ  
 $\rho_s$  = ความหนาแน่นของดิน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $\rho_{w,t}$  = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $M_s$  = น้ำหนักของดินที่อบแห้ง (กรัม)  
 $M_{pw,t}$  = น้ำหนักของพิกโนมิเตอร์และน้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (กรัม)  
 $M_{pws,t}$  = น้ำหนักของพิกโนมิเตอร์ น้ำและดินที่อุณหภูมิทดสอบ (กรัม)

#### ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

$$G_{20^\circ C} = K \times G_t$$

- เมื่อ  $G_{20^\circ C}$  = ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส  
 $K$  = ค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (K) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของอุณหภูมิ (K)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของอุณหภูมิ (K)
22 .0	0.99957	30 .0	0.99744
.1	0.99954	.1	0.99741
.2	0.99952	.2	0.99738
.3	0.99950	.3	0.99735
.4	0.99947	.4	0.99732
.5	0.99945	.5	0.99729
.6	0.99943	.6	0.99726
.7	0.99940	.7	0.99723
.8	0.99938	.8	0.99720
.9	0.99936	.9	0.99716
26 .0	0.99858		
.1	0.99855		
.2	0.99852		
.3	0.99850		
.4	0.99847		
.5	0.99844		
.6	0.99842		
.7	0.99839		
.8	0.99836		
.9	0.99833		

ที่มา: (ASTM international, 2010a)

### 3.2) จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์

จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge,  $pH_{pzc}$ ) คือค่าพีเอชที่ทำให้ประจุที่ผิวของดินมีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถวัดได้โดยวิธีการไตเตรทด้วยค่าพีเอช (pH titration method) โดยขั้นตอนการศึกษาดำเนินการตามการศึกษาของเกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา, 2555) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- นำน้ำกลั่นมาปรับพีเอชด้วยไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีพีเอชต่างๆ กันดังนี้ 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0 และ 12.0 จำนวนพีเอชละ 2 ชุดตัวอย่าง ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง แล้วทำการปรับและวัดค่าพีเอชให้ได้ตามที่กำหนดไว้แล้วใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร



- ควบคุมความเข้มข้นประจุ (Ionic strength) ให้เท่ากับ 10 มิลลิโมลโดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ลงในตัวอย่างที่เตรียมไว้
- ชั่งดินตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม ลงในแต่ละตัวอย่างที่เตรียมไว้
- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- วัดพีเอชภายหลังการเขย่า
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นและค่าพีเอชสุดท้าย แล้วสังเกตจุดที่พีเอชเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือค่าพีเอชที่จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ และใช้ค่าเฉลี่ยพีเอชจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์จากกราฟที่เขียนจากข้อมูลการทดลอง 2 ชุด เป็นค่าตัวแทนของดินตัวอย่างแต่ละประเภท

### 3.3) พื้นที่ผิวจำเพาะ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ใช้หลักการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของ BET (The Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งอาศัยหลักการของการดูดซับก๊าซบนพื้นที่ผิวของตัวอย่าง โดยในการศึกษาใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ของบริษัทไมโครเทรค-เบล (Microtrac Bel, INC) ประเทศญี่ปุ่น รุ่นเบลเซอร์ฟ 2 ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะมีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้

- ชั่งน้ำหนักเซลล์ที่ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างบันทึกเป็น W กรัม
- ใส่ตัวอย่างดินลงในเซลล์ประมาณ 1 – 2 กรัม และชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น S1 คำนวณน้ำหนักดินเท่ากับ S1-W (กรัม)

- นำเซลล์ไปใส่ในเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน
- คำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้เท่ากับค่าพื้นที่ผิวที่เครื่องวัดได้ส่วนด้วยน้ำหนักดิน
- ทำการทดลองซ้ำชนิดดินละ 3 ครั้ง และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าตัวแทนค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของดินแต่ละชนิด

### 3.4) ปริมาณสารอินทรีย์

ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter content) ในดินสามารถหาได้โดยวิธีมาตรฐานตาม ASTM D2974-00 (ASTM international, 2010b) ซึ่งแผนภาพการทดลองแสดงดังภาพที่ 17 โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- เตรียมถ้วยเซรามิก โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นให้เย็นลง จึงนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น W
- ใส่ดินที่เตรียมไว้ลงในถ้วยเซรามิกประมาณ 1 กรัม แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น A
- นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นให้เย็นลง จึงนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น B
- คำนวณร้อยละปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ดังสมการ

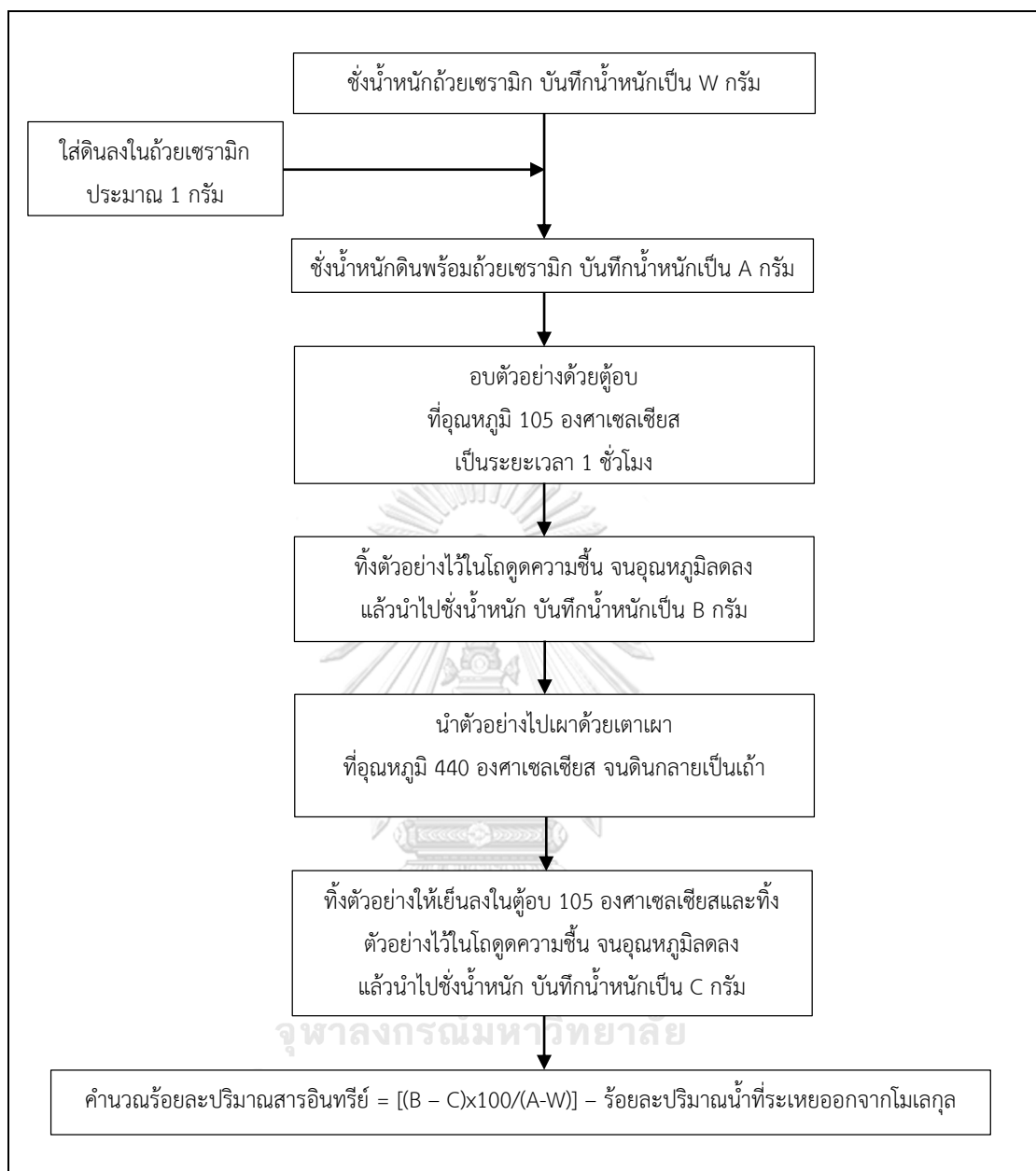
$$Total\ Solid = \frac{B - W}{A - W} \times 100$$

- นำตัวอย่างไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส จนดินกลายเป็นเถ้าทั้งหมด แล้วทำให้เย็นลงโดยนำไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิค่อยๆ ลดลงแล้วนำไปทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นให้เย็นลง จึงนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกน้ำหนักเป็น C

- คำนวณร้อยละปริมาณสารอินทรีย์ในดินได้ดังสมการ

$$Organic\ Solid = \frac{B-C}{A-W} \times 100 - \text{ร้อยละปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากโมเลกุล}$$

- ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างดินละ 3 ครั้ง และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าตัวแทนร้อยละปริมาณสารอินทรีย์ของดินแต่ละชนิด



ภาพที่ 17 แผนภาพการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ของดินตัวอย่าง

### 3.5) พีเอช

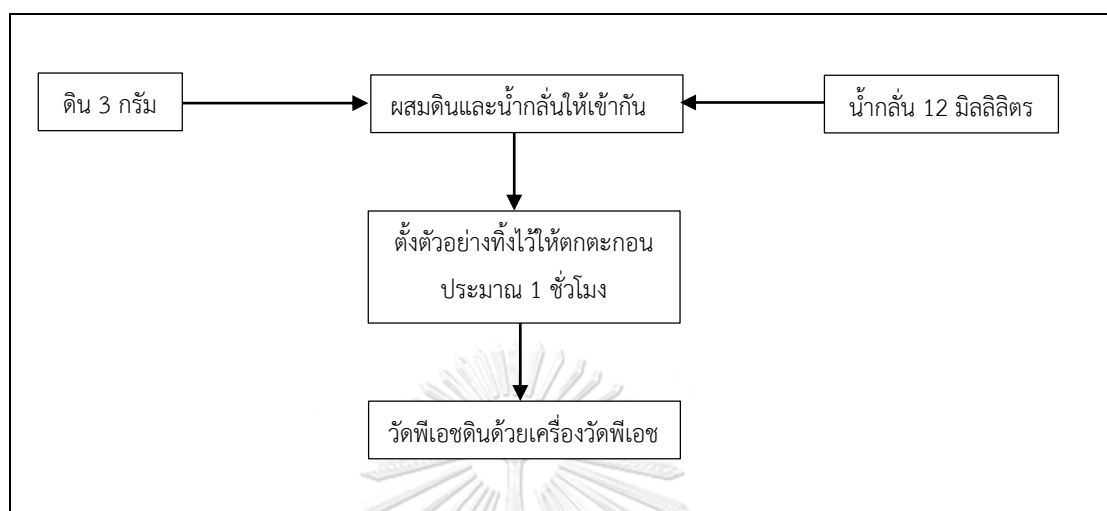
ค่าพีเอช (pH) ดินวัดได้ด้วยวิธีมาตรฐานตาม ASTM D4972 (ASTM international, 2010c) แผนภาพการทดลองแสดงดังภาพที่ 18 โดยมีขั้นตอนการวัดค่าพีเอชดังนี้

- ผสมดินกับน้ำกลั่น โดยใช้ดิน 3 กรัม และน้ำปริมาตร 12 มิลลิลิตร หรือเท่ากับอัตราส่วน 1:4 น้ำหนักดินต่อปริมาตรน้ำกลั่น

- ผสมดินและน้ำกลั่นให้เข้ากันแล้วปล่อยให้ตั้งทิ้งไว้ให้ดินตกตะกอน 1 ชั่วโมง

- วัดพีเอชด้วยเครื่องวัดพีเอช

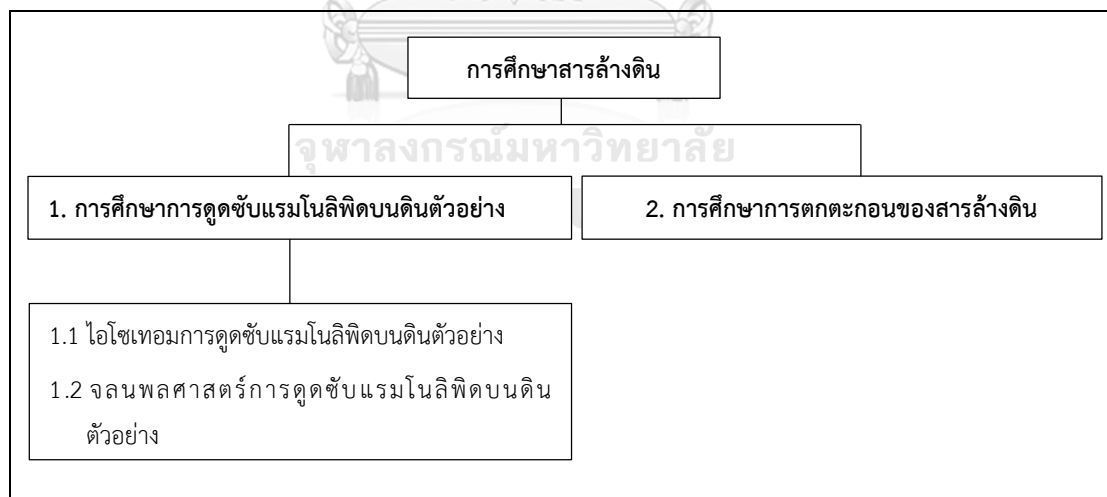
- ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างดินละ 3 ครั้ง และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าตัวแทนค่าพีเอชของดินแต่ละชนิด



ภาพที่ 18 แผนภาพการศึกษาค่าพีเอชของดินตัวอย่าง

### 3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 : ขั้นตอนการศึกษาสารล้างดิน

การศึกษาสารล้างดินแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาการดูดซับของแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง และการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน แสดงดังภาพที่ 19



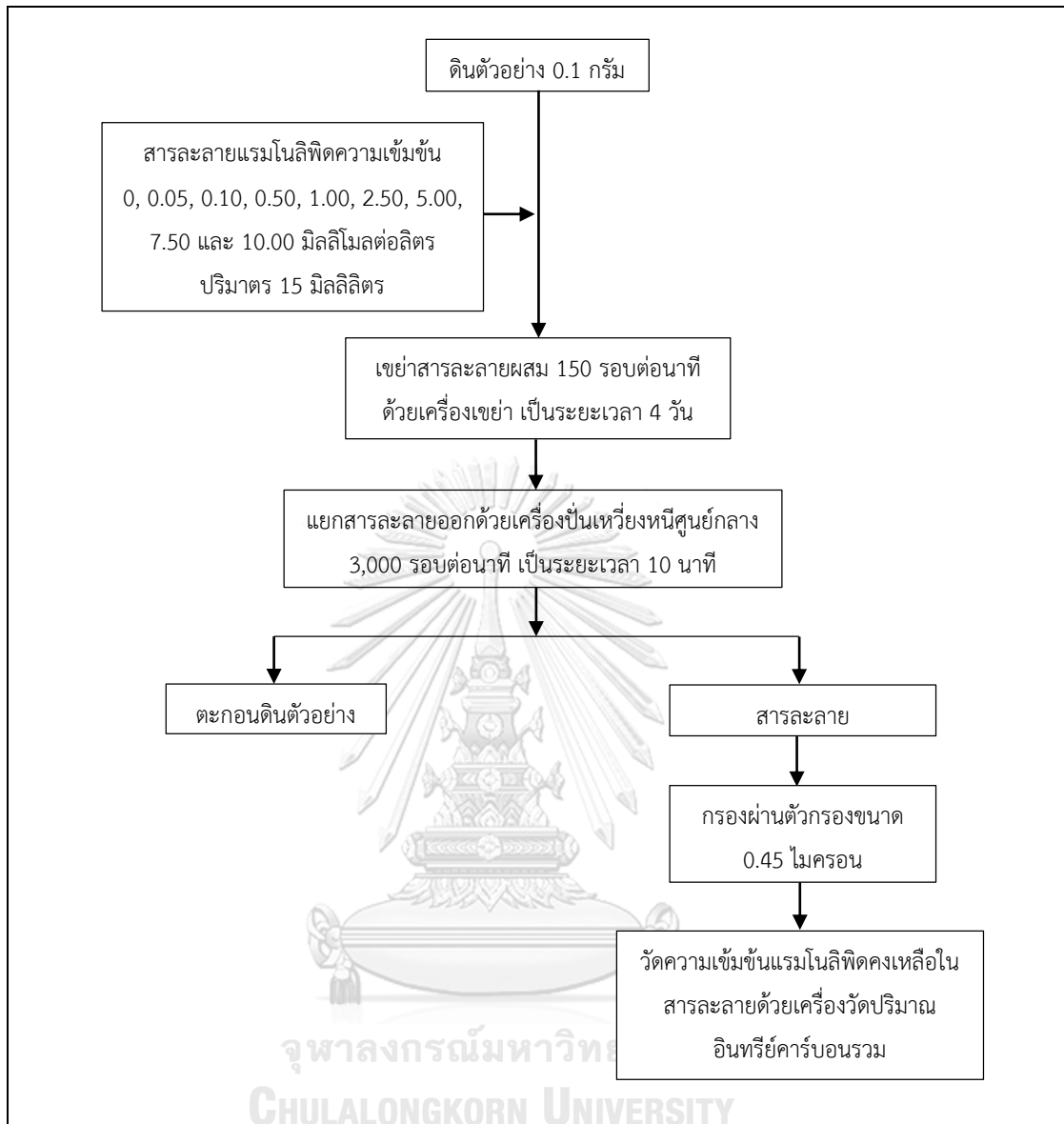
ภาพที่ 19 แผนผังการศึกษาสารล้างดิน

## 1) การศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง

### 1.1) ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์การดูดซับที่สถานะสมดุล โดยสมการไอโซเทอมที่ใช้วิเคราะห์การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่างประกอบด้วยแลงเมียร์ ไอโซเทอมและฟรุนดริชไอโซเทอม ทั้งนี้ขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 20 โดยขั้นตอนการศึกษา ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่างนี้ดำเนินการตามการศึกษาของเกษราพร สุอรุณ และ โกวิทป์ ปิยะมั่งคลา (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทป์ ปิยะมั่งคลา, 2555) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- นำดินตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในหลอดพลาสติกชนิดปิพาร์ขนาด 15 มิลลิลิตร จำนวนทั้งสิ้น 54 หลอด แบ่งเป็นดินเหนียวเคโอลิไนท์ 27 หลอด และดินทรายซิลิกา 27 หลอด
- ใส่สารละลายแรมโนลิพิท 15 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน 9 ความเข้มข้น ดังนี้ 0, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00, 2.50, 5.00, 7.50 และ 10.00 มิลลิโมลต่อลิตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อความเข้มข้นลงในหลอดพลาสติกชนิดปิพาร์ที่มีดินตัวอย่างใส่ไว้แล้ว
- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 วัน
- เมื่อครบ 4 วัน แยกสารละลายแรมโนลิพิทออกจากดินโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองเอาเฉพาะสารละลายแรมโนลิพิทออกด้วยหลอดฉีดยาและตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของแรมโนลิพิทด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer)
- สำหรับการวัดความเข้มข้นของแรมโนลิพิทด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมให้เตรียมสารละลายแรมโนลิพิทที่มีความเข้มข้น 0.0, 0.005, 0.010, 0.020, 0.030 และ 0.050 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของแรมโนลิพิทและพื้นที่ที่เครื่องวัดได้สำหรับใช้เทียบค่าความเข้มข้นแรมโนลิพิทของตัวอย่างที่นำไปตรวจวัด
- สารละลายแรมโนลิพิทที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณแรมโนลิพิทที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer) โดยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัดที่ 50 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร และผลการวัดที่นำเชื่อถือต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of variation: CV) ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์
- นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแต่ละค่าความเข้มข้นและศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมของดินแต่ละประเภท โดยสมการไอโซเทอมที่ใช้ในการวิเคราะห์การดูดซับของแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่างประกอบด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดริชไอโซเทอม

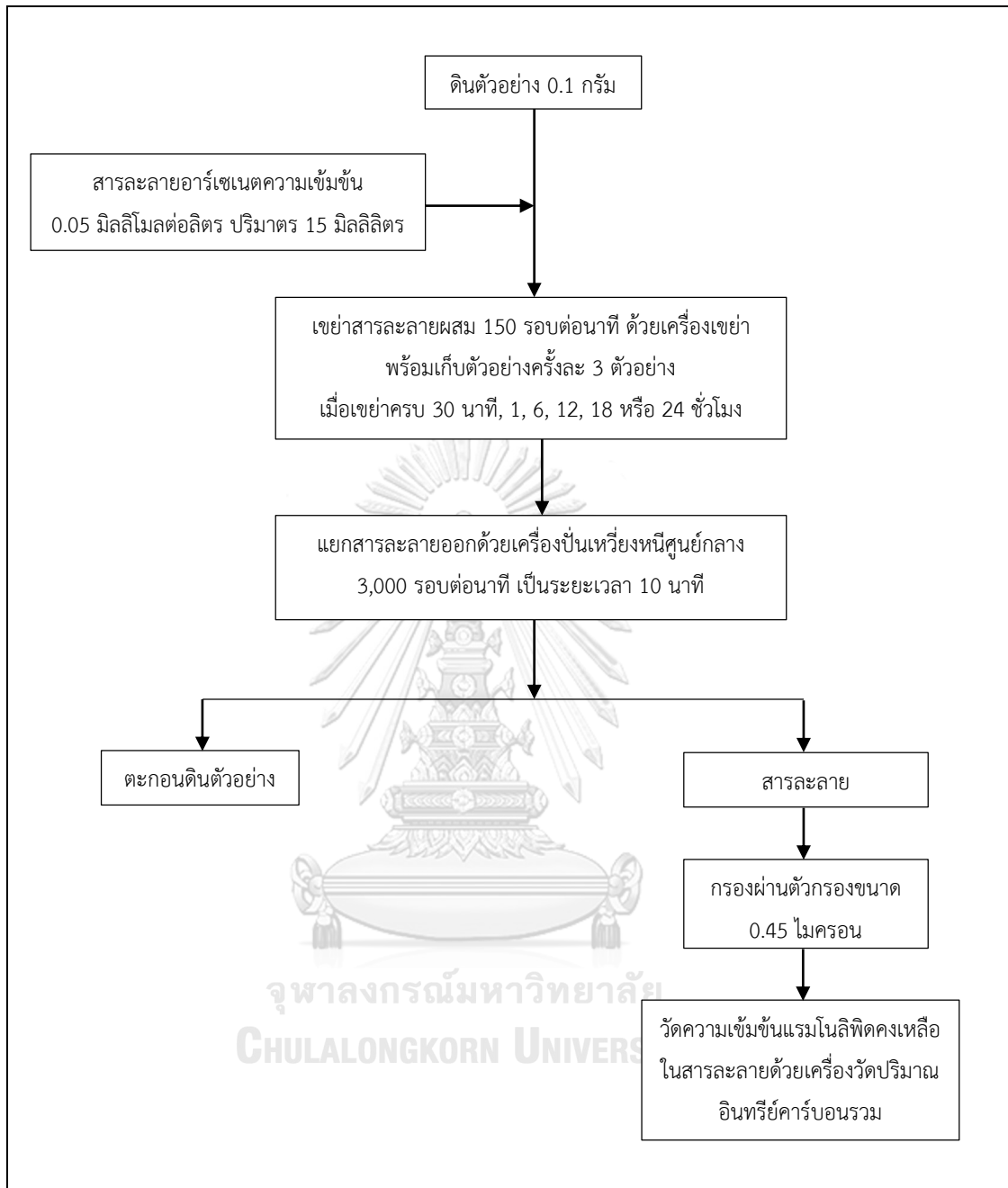


ภาพที่ 20 แผนภาพการศึกษาไอโซโทมการดูดซับแรมโนลิทิดบนดินตัวอย่าง

## 1.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง

วิธีการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 21 การศึกษาใช้สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order) ในการอธิบายความเร็วในการดูดซับแรมโนลิพิทของดินตัวอย่าง โดยขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่างนี้ดำเนินการตามการศึกษาของเกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา, 2555) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- เตรียมสารละลายแรมโนลิพิทความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร
- ผสมดินตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม กับสารละลายแรมโนลิพิทปริมาตร 15 มิลลิลิตร ในหลอดพลาสติกชนิดพีวีคขนาด 15 มิลลิลิตร จำนวนทั้งสิ้น 36 หลอด แบ่งเป็นดินเหนียวเคโอลิไนท์ 18 หลอด และดินทรายซิลิกา 18 หลอด
- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาอย่างละ 3 หลอด เมื่อเขย่าครบตามเวลาดังนี้ 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง
- แยกสารละลายแรมโนลิพิทออกจากดินโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองเอาเฉพาะสารละลายแรมโนลิพิทออกมาด้วยหลอดฉีดยาและตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน
- สารละลายแรมโนลิพิทที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณแรมโนลิพิทที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer)
- สำหรับการวัดความเข้มข้นของแรมโนลิพิทด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมให้เตรียมสารละลายแรมโนลิพิทที่มีความเข้มข้น 0.0, 0.005, 0.010, 0.020, 0.030 และ 0.050 มิลลิโมลต่อลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของแรมโนลิพิทและพื้นที่ที่เครื่องวัดได้สำหรับใช้เทียบค่าความเข้มข้นแรมโนลิพิทของตัวอย่างที่นำไปตรวจวัด
- สารละลายแรมโนลิพิทที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณแรมโนลิพิทที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer) โดยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัดที่ 50 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร และผลการวัดที่น่าเชื่อถือต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of variation: CV) ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์
- นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเวลาการเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกันและวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทของดินแต่ละประเภท โดยใช้สมการสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order) ในการอธิบายความเร็วในการดูดซับแรมโนลิพิทของดินตัวอย่าง



ภาพที่ 21 แผนภาพการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่าง



## 2) การศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน

การศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดินนี้เพื่อสังเกตผลของค่าพีเอชต่อการตกตะกอนของ แรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ รวมถึงการตกตะกอนร่วมของแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ โดยศึกษาที่ ความเข้มข้นแรมโนลิพิดต่ำกว่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical micelle concentration) และ ความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical micelle concentration) ขั้นตอนการศึกษา แสดงดังภาพที่ 22 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดินดังนี้

- เตรียมสารละลายแรมโนลิพิดความเข้มข้น 0.05 และ 10.0 มิลลิโมลต่อลิตร แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ ไฮโดรคลอริก ให้มีค่าพีเอชแต่ละตัวอย่างต่างๆ กัน ให้ครอบคลุมช่วงกรดและเบส (ค่าพีเอชประมาณ 1.00 – 13.00) และสังเกตผลการตกตะกอนของแรมโนลิพิด

- เตรียมสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 และ 10.0 มิลลิโมลต่อลิตร แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ ไฮโดรคลอริก ให้มีค่าพีเอชแต่ละตัวอย่างต่างๆ กัน ให้ครอบคลุมช่วงกรดและเบส (ค่าพีเอชประมาณ 1.00 – 13.00) และสังเกตผลการตกตะกอนของเพอร์ริกคลอไรด์

- เตรียมสารละลายแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 และ 10.0 มิลลิโมลต่อลิตร แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร โดยใส่แรมโนลิพิดปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเพอร์ริกคลอไรด์ 2.5 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเท่ากับแรมโนลิพิด แล้วปรับพีเอชด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือไฮโดรคลอริก วัดพีเอชและสังเกตผลการตกตะกอนของแรมโนลิพิดร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์

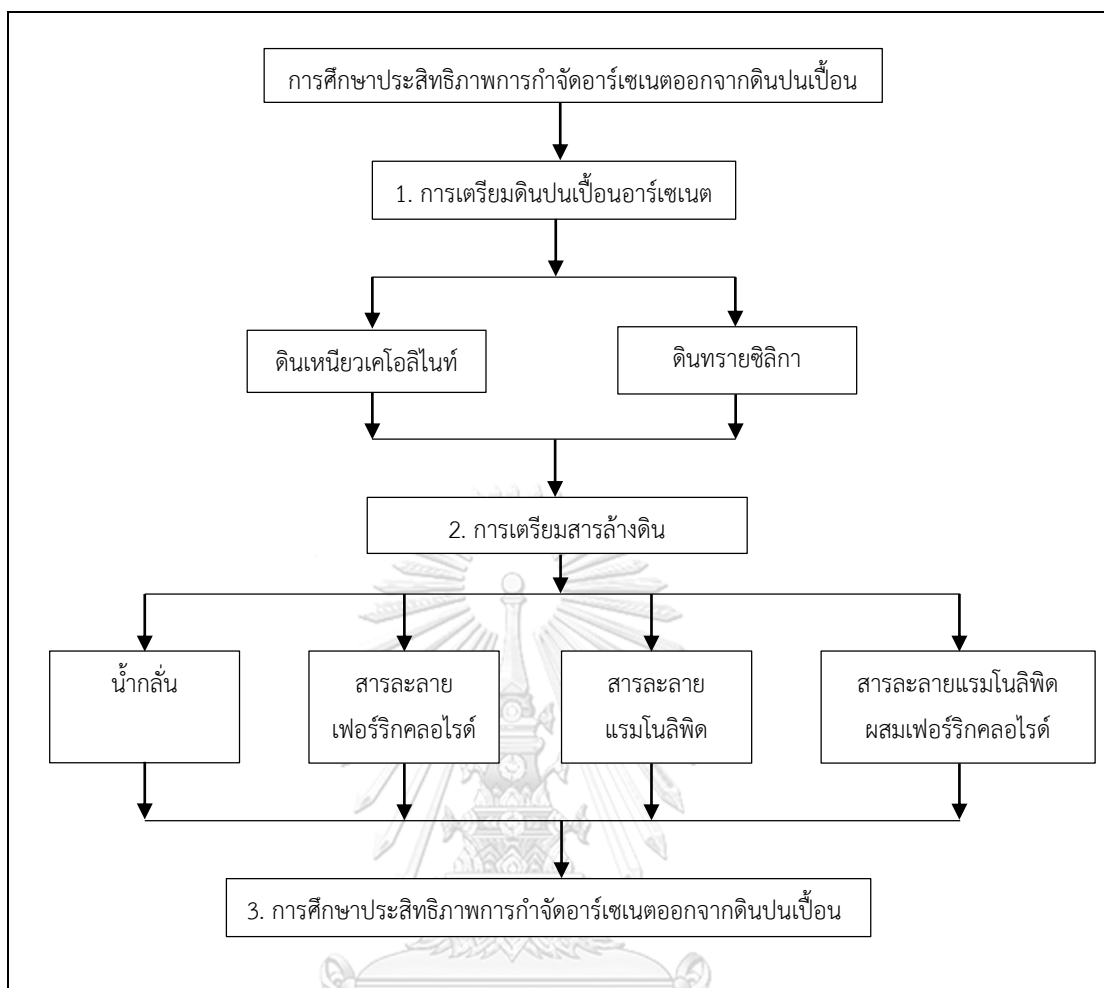
- เตรียมสารละลายแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 และ 10.0 มิลลิโมลต่อลิตร แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร โดยใส่เพอร์ริกคลอไรด์ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมแรมโนลิพิด 2.5 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเท่ากับเพอร์ริกคลอไรด์ แล้วปรับพีเอชด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือไฮโดรคลอริก วัดพีเอชและสังเกตผลการตกตะกอนของแรมโนลิพิดร่วมกับ เพอร์ริกคลอไรด์



ภาพที่ 22 แผนภาพการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน

### 3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3 : ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน

ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน ประกอบไปด้วย การเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนต การเตรียมสารล้างดิน และการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แผนภาพการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนออกจากดินปนเปื้อน

### 1) การเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซน

- เตรียมสารละลายโซเดียมอาร์เซนเตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ผสมดินตัวอย่างกับสารละลายโซเดียมอาร์เซนเตในอัตราส่วน 1:1 น้ำหนักดินต่อสารละลายอาร์เซนเต
- นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 4 วัน
- ล้างดินด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร
- แยกเอาส่วนที่เป็นสารละลายออกจากดิน โดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- นำตัวอย่างดินที่แยกเอาส่วนสารละลายออกแล้วมาจำนวน 0.5 กรัม แล้วนำไปย่อยด้วยกรดไนตริก ความเข้มข้นร้อยละ 65 โดยมวล 10 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครเวฟอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส  $\pm$  5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที (USEPA Method 3052) (US-EPA, 1996) จากนั้นแยกเอาสารละลายออกมาด้วยกระดาษกรอง และนำส่วนของสารละลายไปวัดปริมาณอาร์เซนเตด้วยเครื่องวัด

ปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) เพื่อตรวจสอบปริมาณอาร์เซนิกที่ดินแต่ละประเภทดูดซับไว้ ซึ่งการวัดปริมาณอาร์เซนิกเป็นไปตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5673 – 05 (ASTM international, 2010d) ซึ่งแนะนำความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องวัดปริมาณธาตุสามารถวัดความเข้มข้นอาร์เซนิกได้เท่ากับ 0.9 ไมโครกรัมต่อลิตร

## 2) การเตรียมสารล้างดิน

สารล้างดินที่ใช้สำหรับการทดลองมีจำนวนทั้งสิ้น 4 ชนิด แสดงดังภาพที่ 24 ซึ่งสารล้างดินทั้งหมดถูกปรับให้มีค่าพีเอชเท่ากัน เท่ากับ 11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร โดยมีรายละเอียดดังนี้

- น้ำกลั่น
- สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร
- สารละลายแรมโนลิพิตความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร
- สารละลายแรมโนลิพิตผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร

นำสารล้างดินที่เตรียมมากรองด้วยหลอดฉีดยาและตัวกรองขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วไปวัดปริมาณเฟอร์ริกและแรมโนลิพิตด้วยเครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) และเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer)



ภาพที่ 24 แผนภาพการเตรียมสารล้างดิน

### 3) การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน

ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน ดำเนินการโดยนำดินตัวอย่างปนเปื้อนอาร์เซนต ทั้งดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกา มาล้างด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 25 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อนดังนี้

- นำดินเหนียวเคโอลิไนท์ปนเปื้อนอาร์เซนตหรือดินทรายซิลิกาปนเปื้อนอาร์เซนต จำนวน 1 กรัม ผสมกับสารล้างดินชนิดใดชนิดหนึ่งจาก 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิดและสารละลายแรมโนลิพิดผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเซนต์ปีฟาร์กขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 18 หลอด

- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลารวม 24 ชั่วโมง

- เก็บตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง จากเครื่องเขย่าทุก 4 ชั่วโมง และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดตัวอย่างเป็นค่าตัวแทนผลการทดลอง

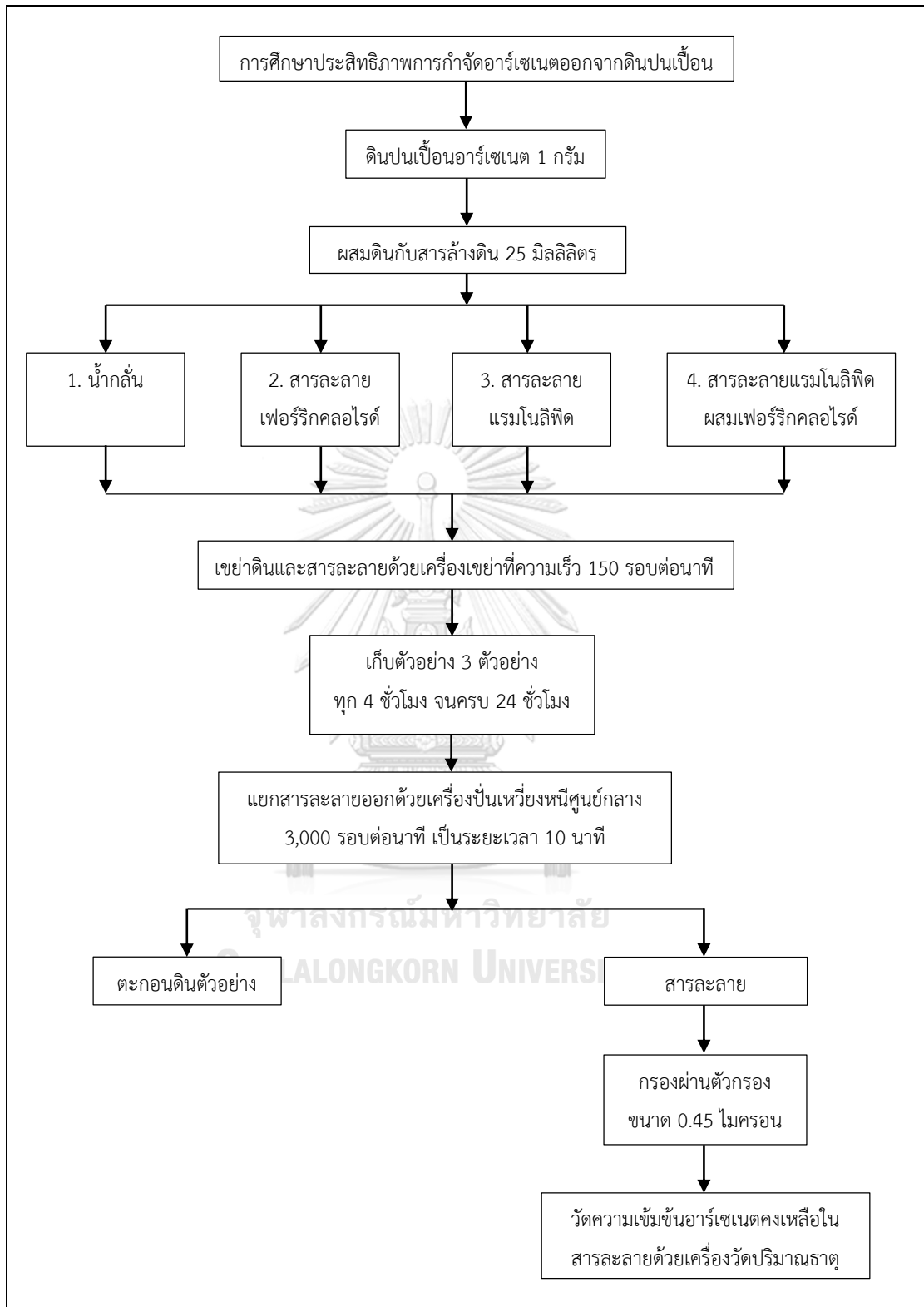
- ตัวอย่างที่เก็บมาแล้วให้นำไปแยกดินออกจากสารล้างดินโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

- กรองเอาสารล้างดินออกจากดินด้วยหลอดฉีดยาและตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน

- สารล้างดินที่แยกได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนตที่ถูกล้างออกมาด้วยสารล้างดินแต่ละชนิดโดยใช้เครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) ซึ่งเป็นไปตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5673 – 05 (ASTM international, 2010d) ซึ่งแนะนำความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องวัดปริมาณธาตุสามารถวัดความเข้มข้นอาร์เซนิกได้เท่ากับ 0.9 ไมโครกรัมต่อลิตร

- ทำซ้ำจากขั้นตอนแรกโดยเปลี่ยนสารล้างดินจนครบทั้ง 4 ชนิด

ผลการทดลองที่ได้จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเวลาล้างดินต่อการกำจัดอาร์เซนตของสารล้างดินแต่ละชนิดรวมทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตที่ปนเปื้อนในดินของสารล้างดินแต่ละชนิด



ภาพที่ 25 แผนภาพแสดงขั้นตอนการล้างดิน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (Rhamnolipids) ร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์ด้วยวิธีการล้างดินแบบแบทช์ เพื่อกำจัดอาร์เซนออกจากดินปนเปื้อนอาร์เซนเตด 2 ชนิด คือ ดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกา โดยการทดลองประกอบด้วย 3 ช่วงการทดลอง ได้แก่ การทดลองช่วงที่ 1 ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การเตรียมดินทดลองเบื้องต้น การศึกษาการดูดซับอาร์เซนเตดบนดินตัวอย่าง การทดสอบลักษณะทางกายและทางเคมีของดินตัวอย่าง การทดลองช่วงที่ 2 ขั้นตอนการศึกษาร่างล้างดิน แบ่งการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิดบนดินตัวอย่าง และการทดสอบการตกตะกอนของสารล้างดิน และการทดลองช่วงที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดออกจากดินปนเปื้อน ประกอบไปด้วย การเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนเตด การเตรียมสารล้างดิน และการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตดออกจากดินปนเปื้อน

#### 4.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1: ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง

##### 1) ผลการเตรียมดินทดลองเบื้องต้น

ผลการศึกษาพบว่า การเตรียมดินตัวอย่างโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส กับดินตัวอย่างซึ่งเป็นดินเกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) จากบริษัทซิกมา-อัลดริช ไม่มีผลต่อปริมาณสารอินทรีย์ของดินทดลอง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ของดินทดลองดังกล่าวมีปริมาณต่ำมากอยู่แล้ว ดังนั้นการล้างดินตัวอย่างที่เป็นดินเกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) จึงไม่มีความจำเป็น ส่วนค่าพีเอชของดินก่อนและหลังการเตรียมดินมีค่าเท่ากัน ดังนั้นแล้วการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ล้างดินจึงไม่มีผลต่อค่าพีเอชของดินตัวอย่าง

นอกจากนี้ในขั้นตอนการเตรียมดินทดลองเบื้องต้นได้ทำการคัดแยกขนาดของดินทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลผู้ผลิต ซึ่งระบุว่าดินเหนียวเคโอลิไนท์มีขนาดเม็ดดิน 26 – 75 ไมครอน และดินทรายซิลิกามีขนาดเม็ดดิน 212 – 300 ไมครอน จากผลการทดลองพบว่าดินทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเป็นไปตามข้อมูลที่ผู้ผลิตระบุ

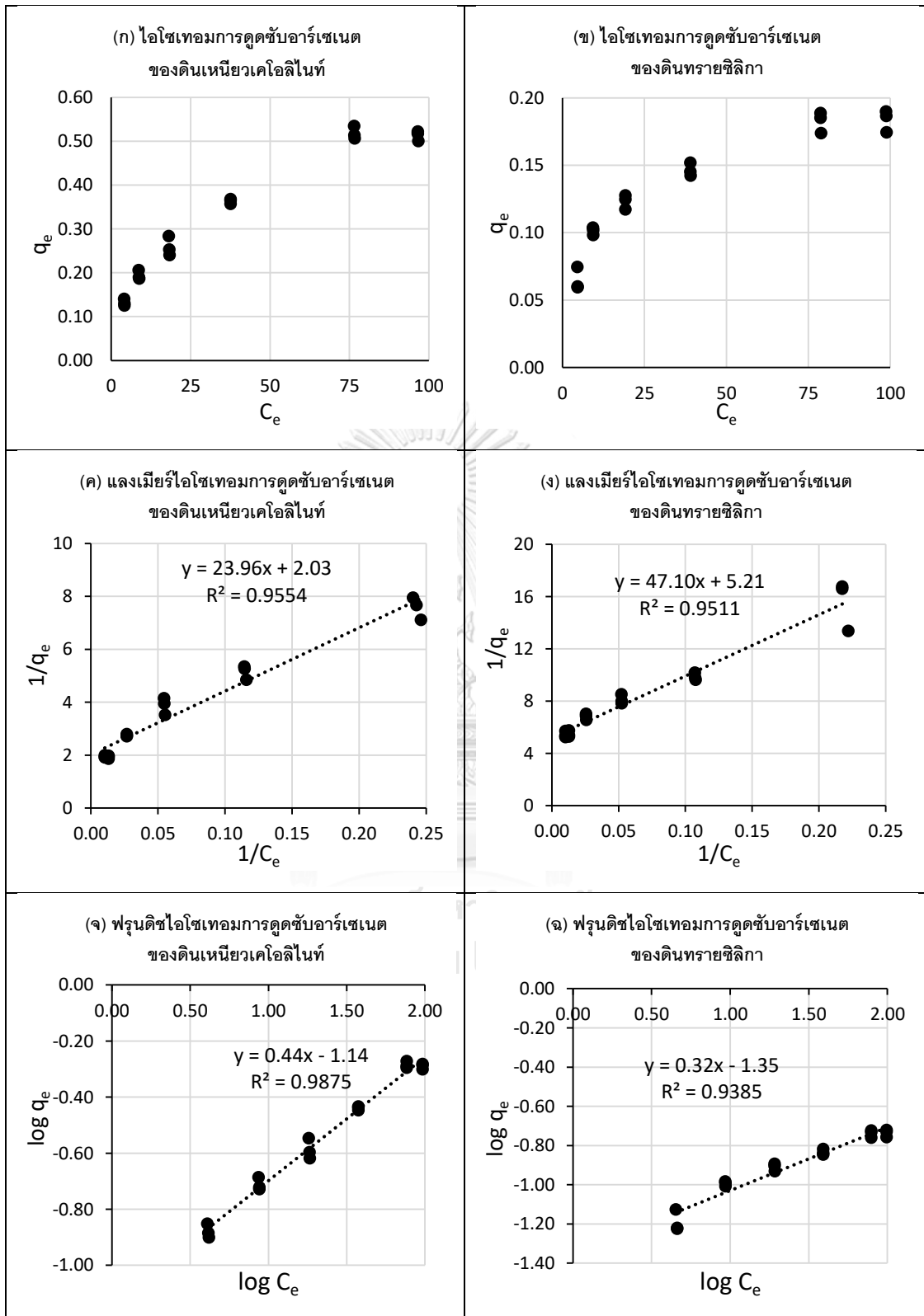
## 2) ผลการศึกษาการดูดซับอาร์เซเนตบนดินตัวอย่าง

### 2.1) ไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซเนตบนดินตัวอย่าง

การดูดซับอาร์เซเนตของดินตัวอย่างทั้ง 2 ประเภท เป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงแวนเดอร์วาลส์ เนื่องจากประจุบนผิวของดินตัวอย่างเป็นค่าประจุลบ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับอาร์เซเนตที่เป็นประจุลบ ทั้งนี้ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซเนตบนดินตัวอย่างพบว่า การดูดซับอาร์เซเนตบนดินเหนียวเคโอลิโนท์ตามสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9554 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.1245 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการฟรุนดิชไอโซเทอมที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9875 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.0188 พบว่า การดูดซับอาร์เซเนตของดินเหนียวเคโอลิโนท์สอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดิชไอโซเทอมมากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับอาร์เซเนตของดินเหนียวเคโอลิโนท์เกิดขึ้นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) มีค่าความร้อนของการดูดซับและค่าพลังงานไม่เท่ากัน และการดูดซับอาร์เซเนตเกิดขึ้นทางกายภาพ ทั้งนี้จากค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.44 ซึ่งหมายถึงปริมาณพื้นผิวบนดินเหนียวเคโอลิโนท์ที่มีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับอาร์เซเนต

ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซเนตของดินทรายซิลิกา พบว่า การดูดซับอาร์เซเนตบนดินทรายซิลิกาตามสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9511 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.0114 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการฟรุนดิชไอโซเทอมที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9385 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.0145 พบว่า ดินทรายซิลิกามีลักษณะการดูดซับอาร์เซเนตสอดคล้องกับสมการการดูดซับของแลงเมียร์ไอโซเทอมมากกว่าฟรุนดิชไอโซเทอม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับอาร์เซเนตของดินทรายซิลิกาเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งโมเลกุลอาร์เซเนตที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน โดยแต่ละโมเลกุลของอาร์เซเนตจะดูดซับโมเลกุลของดินทรายซิลิกาได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) และค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) การดูดซับอาร์เซเนตของดินทรายซิลิกาของสมการทั้งสองไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญประกอบกับพื้นที่ผิวของดินทรายซิลิกามีค่าประจุเป็นลบเช่นเดียวกับอาร์เซเนตและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ (ดูผลการทดลองที่ 3.2 และ 3.3 ประกอบ) การดูดซับที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากแรงทางกายภาพเท่านั้น และมีความสามารถในการดูดซับต่ำจนใกล้เคียงกับการดูดซับแบบชั้นเดียว ดังนั้นแล้วการดูดซับอาร์เซเนตของดินทรายซิลิกาจึงเป็นการดูดซับตามสมการฟรุนดิชไอโซเทอมมากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอม ทั้งนี้จากค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.32 ซึ่งหมายถึงปริมาณพื้นผิวบนดินทรายซิลิกามีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับอาร์เซเนต รายละเอียดการศึกษาการดูดซับอาร์เซเนตบนดินตัวอย่างแสดงดังภาคผนวก ก ส่วนกราฟเส้นตรงของสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์และสมการการดูดซับแบบฟรุนดิชแสดงดังภาพที่ 26 ซึ่งสามารถสรุปสมการไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซเนตและค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับของดินทั้ง 2 ประเภท ได้ดังตารางที่ 10





ภาพที่ 26 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนตบนดินตัวอย่าง

ตารางที่ 10 สรุปสมการไอโซเทอมและค่าคงที่การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง

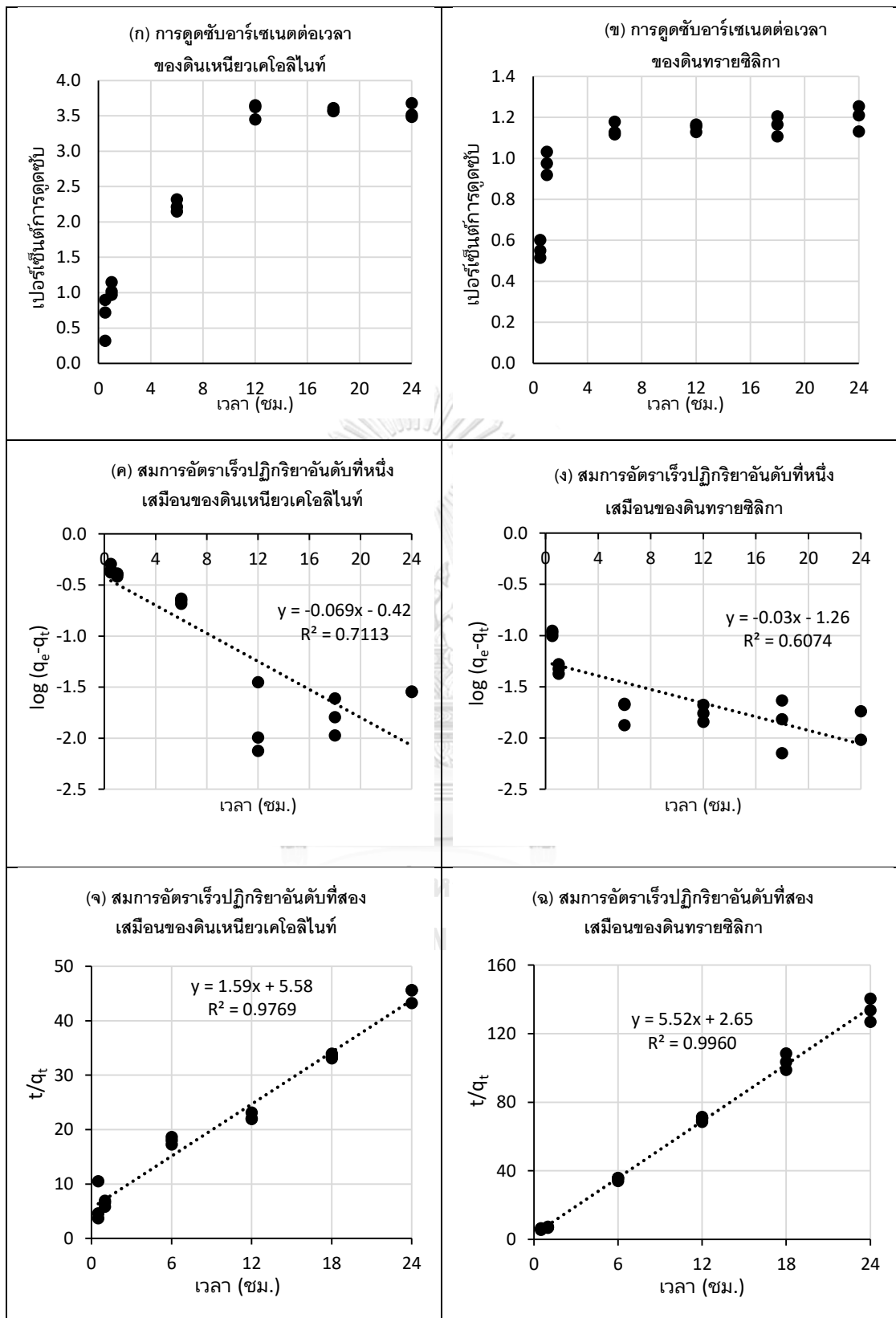
ลำดับ	รายการ	แลงเมียร์ไอโซเทอม	ฟรุนดิชไอโซเทอม
<b>ดินเหนียวเคลอไลน์ท์</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = 23.96X + 2.03$	$y = 0.44X - 1.14$
2	สมการไอโซเทอม	$q_e = \frac{0.042C_e}{1 + 0.085C_e}$	$q_e = 0.073C_e^{1/2.27}$
3	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ( $K_L$ ) (ล./มก.)	0.085	-
4	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ( $q_m$ ) (มก./กรัม)	0.4935	-
5	ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (n)	-	2.27
6	ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ( $K_F$ ) (มก./กรัม) (ล./มก.) <sup>(1/n)</sup>	-	0.0726
7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.9554	0.9875
8	Chi-Square ( $\chi^2$ )	0.1243	0.0188
<b>ดินทรายซิลิกา</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = 47.07X + 5.21$	$y = 0.32X - 1.35$
2	สมการไอโซเทอม	$q_e = \frac{0.021C_e}{1 + 0.111C_e}$	$q_e = 0.044C_e^{1/3.10}$
3	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ( $K_L$ ) (ล./มก.)	0.1107	-
4	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ( $q_m$ ) (มก./กรัม)	0.1920	-
5	ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (n)	-	3.10
6	ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ( $K_F$ ) (มก./กรัม) (ล./มก.) <sup>(1/n)</sup>	-	0.0441
7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.9511	0.9385
8	Chi-Square ( $\chi^2$ )	0.0114	0.0145

## 2.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง

ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง พบว่า ความเร็วในการดูดซับอาร์เซนเตของดินเหนียวเคโอลิไนท์ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7113 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เมื่อเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง เท่ากับ 0.4800 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9769 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เมื่อเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง เท่ากับ 0.2440 พบว่า ดินเหนียวเคโอลิไนท์มีความเร็วในการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนมากกว่าสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน อีกทั้งผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตที่สมดุลของเคโอลิไนท์ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนมีค่า เท่ากับ 0.629 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งเท่ากับ 0.555 มิลลิกรัมต่อกรัม มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.378 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนเตเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดินเหนียวเคโอลิไนท์จะดูดซับอาร์เซนเตและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 7 ชั่วโมง และมีอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับเท่ากับ 0.179 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง

ส่วนผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตของดินทรายซิลิกา พบว่า ความเร็วในการดูดซับอาร์เซนเตของดินทรายซิลิกาตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.6074 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เมื่อเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง เท่ากับ 0.8873 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9960 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เมื่อเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง เท่ากับ 0.0848 พบว่า ดินทรายซิลิกามีความเร็วในการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนมากกว่าสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน อีกทั้งผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตที่สมดุลของดินทรายซิลิกาตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนมีค่า เท่ากับ 0.181 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งเท่ากับ 0.189 มิลลิกรัมต่อกรัม มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.055 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิกเท่ากับ 100 มก./ล. ดินทรายซิลิกาจะดูดซับอาร์เซนเตและเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และมีอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับเท่ากับ 0.377 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง

รายละเอียดการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่างแสดงดังภาคผนวก ข ส่วนกราฟเส้นตรงของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนแสดงดังภาพที่ 27 ซึ่งสามารถสรุปสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตของดินทั้ง 2 ประเภท ได้ดังตารางที่ 11



ภาพที่ 27 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอาร์เซนตบนดินตัวอย่าง

ตารางที่ 11 สรุปสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเดบนดินตัวอย่าง

ลำดับ	รายการ	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา อันดับที่หนึ่งเสมือน	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา อันดับที่สองเสมือน
<b>ดินเหนียวเคโอลิไนท์</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = -0.069X - 0.42$	$y = 1.59X + 5.58$
2	สมการจลนพลศาสตร์	$dq_t/dt = 0.16(0.378 - q_t)$	$dq_t/dt = 0.45(0.629 - q_t)^2$
3	สมการอินทิเกรตของจลนพลศาสตร์	$q_t = 0.38 - 10^{(-0.069t - 0.42)}$	$q_t = 0.63t/(t + 3.51)$
4	ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเดที่สมดุล ( $q_e$ ) (มก./ก.)	0.378	0.629
5	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 1 ( $k_1$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	0.1584	-
6	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 2 ( $k_2$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	-	0.453
7	อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้น (h) (มก./ก.-ชม.)	-	0.179
8	ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ ( $t_{1/2}$ ) (นาที)	-	210
9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.7113	0.9769
10	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.4800	0.2440
<b>ดินทรายซิลิกา</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = -0.033X - 1.26$	$y = 5.52X + 2.65$
2	สมการจลนพลศาสตร์	$dq_t/dt = 0.08(0.055 - q_t)$	$dq_t/dt = 11.52(0.181 - q_t)^2$
3	สมการอินทิเกรตของจลนพลศาสตร์	$q_t = 0.055 - 10^{(-0.033t - 1.26)}$	$q_t = 0.18t/(t + 0.48)$
4	ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเดที่สมดุล ( $q_e$ ) (มก./ก.)	0.055	0.181
5	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 1 ( $k_1$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	0.077	-
6	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 2 ( $k_2$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	-	11.52
7	อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้น (h) (มก./ก.-ชม.)	-	0.377
8	ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ ( $t_{1/2}$ ) (นาที)	-	29
9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.6074	0.9960
10	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.8873	0.0848

### 3) ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่าง

#### 3.1) ค่าความถ่วงจำเพาะ

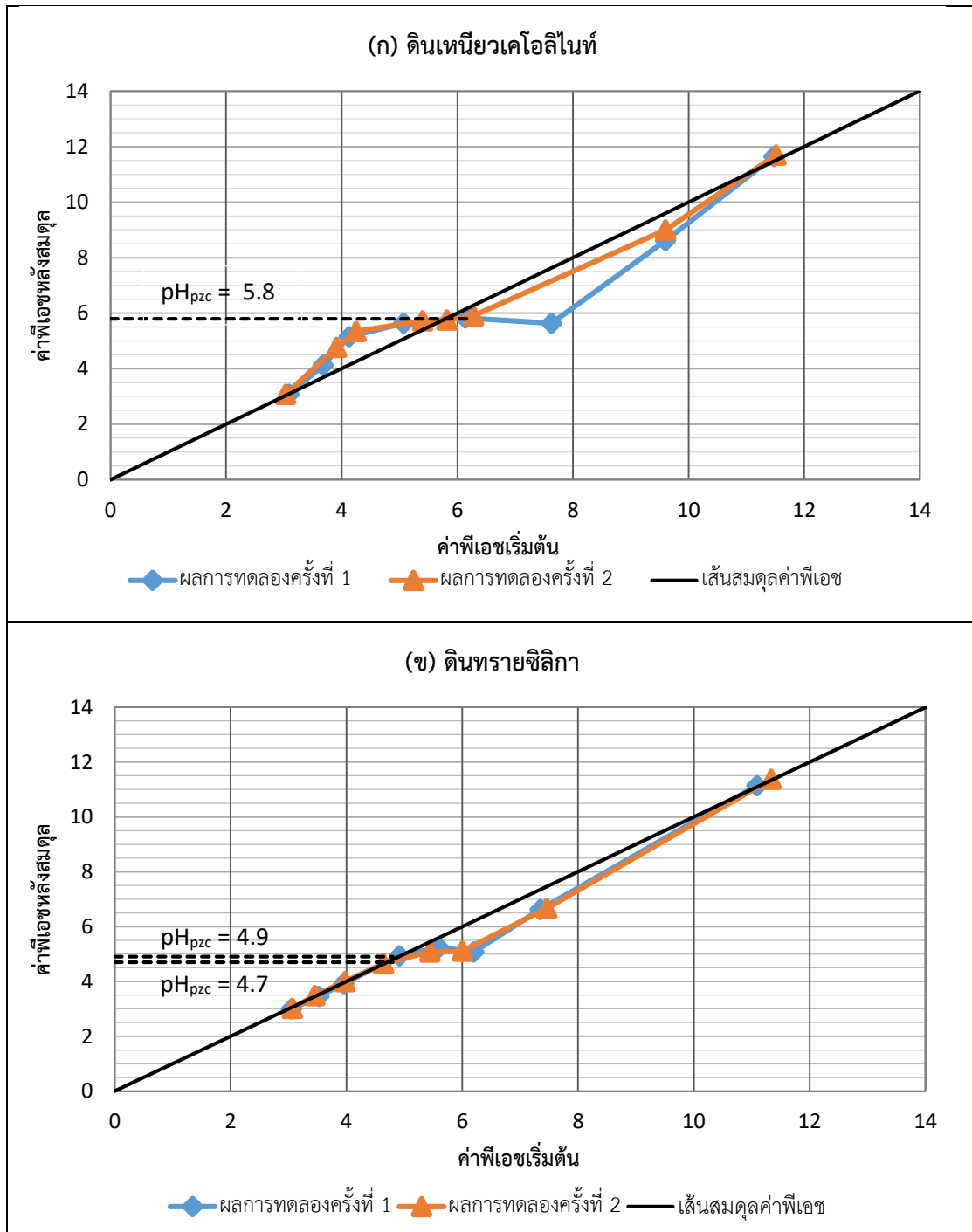
ผลการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของดินตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐาน การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดินโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์หรือ ASTM D854-02 พบว่าดินเหนียว เคโอลิไนท์มีค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 2.77 และดินทรายซิลิกา มีค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 2.67

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเป็นสมบัติที่แสดงลักษณะของดินได้ โดยทั่วไปดินจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.6 – 2.8 กรณีที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 2.6 อาจจะมีอินทรีย์สารเจือปน หรือมีธาตุเบาต่างๆ ปะปนอยู่ และในกรณีที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 2.8 อาจมีธาตุหนักปะปนอยู่ (Essington, 2015) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จากการทดลองพบว่าอยู่ในช่วง 2.60 – 2.80 จึงสามารถอนุมานได้ว่าดินตัวอย่างทั้ง 2 ประเภท ไม่มีอินทรีย์สาร ธาตุเบา และธาตุหนักเจือปนแต่อย่างใด รายละเอียดผลการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะแสดงดังภาคผนวก ค

#### 3.2) จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์

จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge,  $pH_{pzc}$ ) คือค่าพีเอชที่ทำให้ประจุที่ผิวของดินมีค่าเป็นกลางหรือประจุรวมที่ผิวดินเป็นศูนย์ ผลการศึกษาพบว่าค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกามีค่าเท่ากับ 5.8 และ 4.8 ตามลำดับ โดยวิเคราะห์ค่าได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชก่อนและหลังการดูดซับในสารละลายกรดและด่างที่อยู่ในช่วงพีเอช 3 – 12 ดังแสดงในภาพที่ 28 และรายละเอียดผลการศึกษาจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์แสดงดังภาคผนวก ง

จากผลการทดลองเมื่อดินอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชน้อยกว่าจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ประจุที่ผิวของดินจะมีค่าเป็นบวก และในกรณีที่ดินอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชมากกว่าจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ประจุที่ผิวของดินจะมีค่าเป็นลบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าพีเอชที่ทำการล้างดินคือพีเอช 11 ซึ่งมากกว่าค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินตัวอย่างทั้งสอง ดังนั้นแล้วจึงสรุปได้ว่าขณะทำการทดลองการล้างดินประจุที่ผิวของดินตัวอย่างทั้งสองแสดงค่าเป็นประจุลบ



ภาพที่ 28 ผลการศึกษาจุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินตัวอย่าง

(ก) ดินเหนียวเคลอไลไนท์ (ข) ดินทรายซิลิกา

### 3.3) พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Specific surface area and pore volume) พบว่า ดินเหนียวเคโอลิโนท์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 6.9227 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.02991 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่วนดินทรายซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.02806 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.00017 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบดินทั้งสองประเภทแล้ว พบว่า ดินเหนียวเคโอลิโนท์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าดินทรายซิลิกา 246.7 เท่า และ 175.9 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นแล้วดินเหนียวเคโอลิโนท์จึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับอาร์เซนิตได้ดีกว่าดินทรายซิลิกา โดยผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการทดลองพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของดินตัวอย่าง

ลำดับ	รายการ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุนรวม (ลบ.ซม./กรัม)
1	ดินเหนียวเคโอลิโนท์	6.9227	0.02991
2	ดินทรายซิลิกา	0.02806	0.00017
3	จำนวนเท่าของดินเหนียวเคโอลิโนท์ต่อดินทรายซิลิกา	246.7	175.9

### 3.4) ปริมาณสารอินทรีย์

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อนำดินตัวอย่างทั้งสองชนิดไประเหยน้ำที่ 105 องศาเซลเซียสและเผาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ดินเหนียวเคโอลิโนท์และดินทรายซิลิกามีน้ำหนักลดลงร้อยละ 2.70 และ 0.09 เมื่อเทียบกับน้ำหนักหลังระเหยน้ำที่ 105 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากดินเหนียวเคโอลิโนท์มีน้ำเป็นองค์ประกอบในสูตรโมเลกุลร้อยละ 13.95 ของน้ำหนัก และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าน้ำในโมเลกุลของดินเหนียวเคโอลิโนท์จะเริ่มระเหยที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส (Elimbi, Tchakoute และ Njopwouo, 2010) โดยมีลักษณะการระเหยแบบ 2 ขั้นตอน คือช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น 440 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยออกจากโมเลกุลประมาณร้อยละ 2.10 ของน้ำหนัก และช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 650 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยออกจากโมเลกุลประมาณร้อยละ 9.49 ของน้ำหนัก (Diffo, Elimbi, Cyr, Manga และ Kouamo, 2014) ดังนั้นแล้วจึงสรุปได้ว่าดินเหนียวเคโอลิโนท์และดินทรายซิลิกามีปริมาณสารอินทรีย์ร้อยละ 0.60 และ 0.09 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Liao, Li และ Yan (2015) ซึ่งทำการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ในดินปนเปื้อนด้วยวิธีดังกล่าวเช่นกัน พบว่า ดินตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 6.69 ส่วนงานวิจัยของ Cao และคณะ (2015) พบว่า ดินปนเปื้อนมีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 3.4 ซึ่งปริมาณสารอินทรีย์ในดินขึ้นกับความอุดมสมบูรณ์ของดินในแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวเคโอลิโนท์และดินทรายซิลิกาที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดินเกรดวิเคราะห์ จึงมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำกว่าตัวอย่างดินจริงในงานวิจัยอื่น โดยรายละเอียดผลการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์แสดงดังภาคผนวก จ



### 3.5) พีเอช

ผลการศึกษาค่าพีเอช (pH) ของดินตัวอย่าง พบว่า ดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินทรายซิลิกาที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.52 และ 6.66 ตามลำดับ โดยที่ดินเหนียวเคโอลิไนต์จัดว่าเป็นดินที่มีความเป็นกรดเล็กน้อย ส่วนดินทรายซิลิกาจัดว่าเป็นกลาง (United States Department of Agriculture, 1993) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชที่จุดที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินทรายซิลิกาที่มีค่าเท่ากับ 5.8 และ 4.8 แล้ว จึงกล่าวได้ว่าโดยปกติแล้วดินทั้งสองประเภทมีค่าประจุที่ผิวเป็นประจุลบ

## 4.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2: ขั้นตอนการศึกษาสารล้างดิน

### 1) ผลการศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิบบนดินตัวอย่าง

#### 1.1) ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิบบนดินตัวอย่าง

การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินตัวอย่างทั้ง 2 ประเภท เป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงแวนเดอร์วาลส์ เนื่องจากประจุบนผิวของดินตัวอย่างเป็นค่าประจุลบ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแรมโนลิพิบที่เป็นประจุลบ ทั้งนี้ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิบบนดินตัวอย่าง พบว่า การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินเหนียวเคโอลิไนต์ตามสมการการดูดซับแลงเมียร์ไอโซเทอมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9657 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.3097 เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินทรายซิลิกาไอโซเทอมซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9836 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.0757 พบว่า การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินเหนียวเคโอลิไนต์สอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดิชไอโซเทอมมากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับแรมโนลิพิบบนดินเหนียวเคโอลิไนต์เกิดขึ้นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) มีค่าความร้อนของการดูดซับและค่าพลังงานไม่เท่ากัน รวมทั้งการดูดซับเกิดขึ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้จากค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.77 ซึ่งหมายถึงปริมาณพื้นผิวของดินเหนียวเคโอลิไนต์ที่มีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับแรมโนลิพิบ

ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิบบนดินทรายซิลิกา พบว่า การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินทรายซิลิกาตามสมการการดูดซับแลงเมียร์ไอโซเทอมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9957 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.0066 เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินทรายซิลิกาไอโซเทอมซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9696 และมีค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) เท่ากับ 0.0468 พบว่า การดูดซับแรมโนลิพิบบนดินทรายซิลิกาสอดคล้องกับสมการการดูดซับของแลงเมียร์ไอโซเทอมมากกว่าฟรุนดิชไอโซเทอม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับแรมโนลิพิบบนดินทรายซิลิกาเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน โดยแต่ละโมเลกุลของดินทรายซิลิกาจะดูดซับโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ( $q_m$ ) เท่ากับ 0.187 มิลลิโมลแรมโนลิพิบ

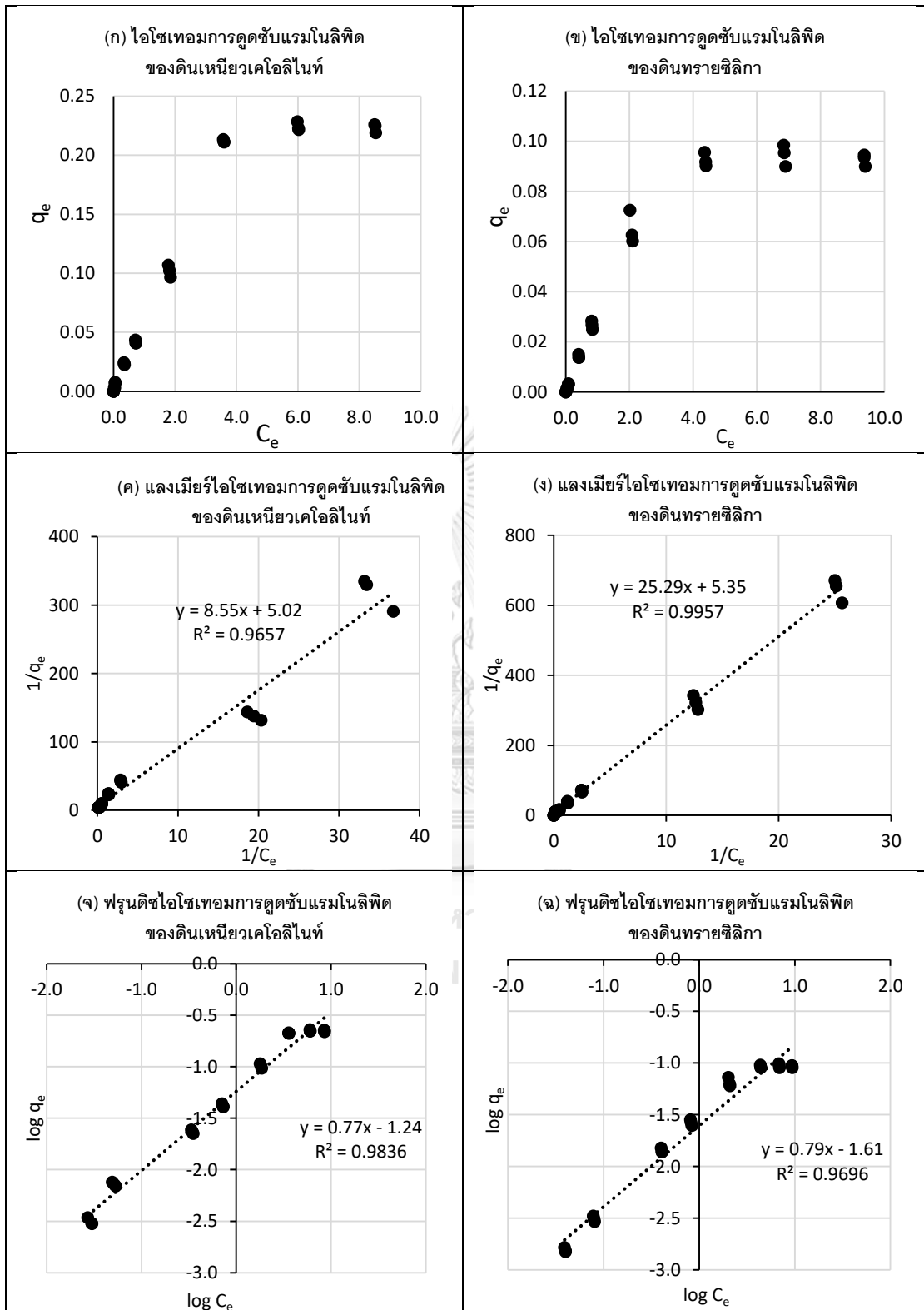
ต่อกรัมดิน หรือ 187 มิลลิโมลแรมโนลิพิตต่อกิโลกรัมดิน การดูดซับไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุล มีค่าความร้อนของการดูดซับและค่าพลังงานในการดูดซับเท่ากันและคงที่

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิตของดินตัวอย่างทั้ง 2 ประเภท สอดคล้องกับผลการศึกษา Ochoa-Loza และคณะ (Ochoa-Loza และคณะ, 2006) ซึ่งทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิตประเภท R1 บนดินตัวอย่างหลายประเภท โดยผลการทดลอง พบว่า ดินเหนียวเคโอลิไนท์ดูดซับแรมโนลิพิต R1 สอดคล้องกับฟรอนดิชไอโซเทอมและดูดซับแรมโนลิพิตได้ปริมาณมากโดยเฉพาะช่วงที่ความเข้มข้นแรมโนลิพิต R1 ต่ำกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนดินทรายซิลิกาดูดซับแรมโนลิพิต R1 สอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอมและเกิดการดูดซับแรมโนลิพิต R1 เพียงเล็กน้อย

รายละเอียดการศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิตบนดินตัวอย่างแสดงดังภาคผนวก ฉ ส่วนกราฟเส้นตรงของสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์และสมการการดูดซับแบบฟรอนดิชแสดงดังภาพที่ 29 ซึ่งสามารถสรุปสมการไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิตและค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับของดินทั้ง 2 ประเภท ได้ดังตารางที่

13





ภาพที่ 29 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิทิดบนดินตัวอย่าง

ตารางที่ 13 สรุปสมการไอโซเทอมและค่าคงที่การดูดซับแรมโนลิฟิตบนดินตัวอย่าง

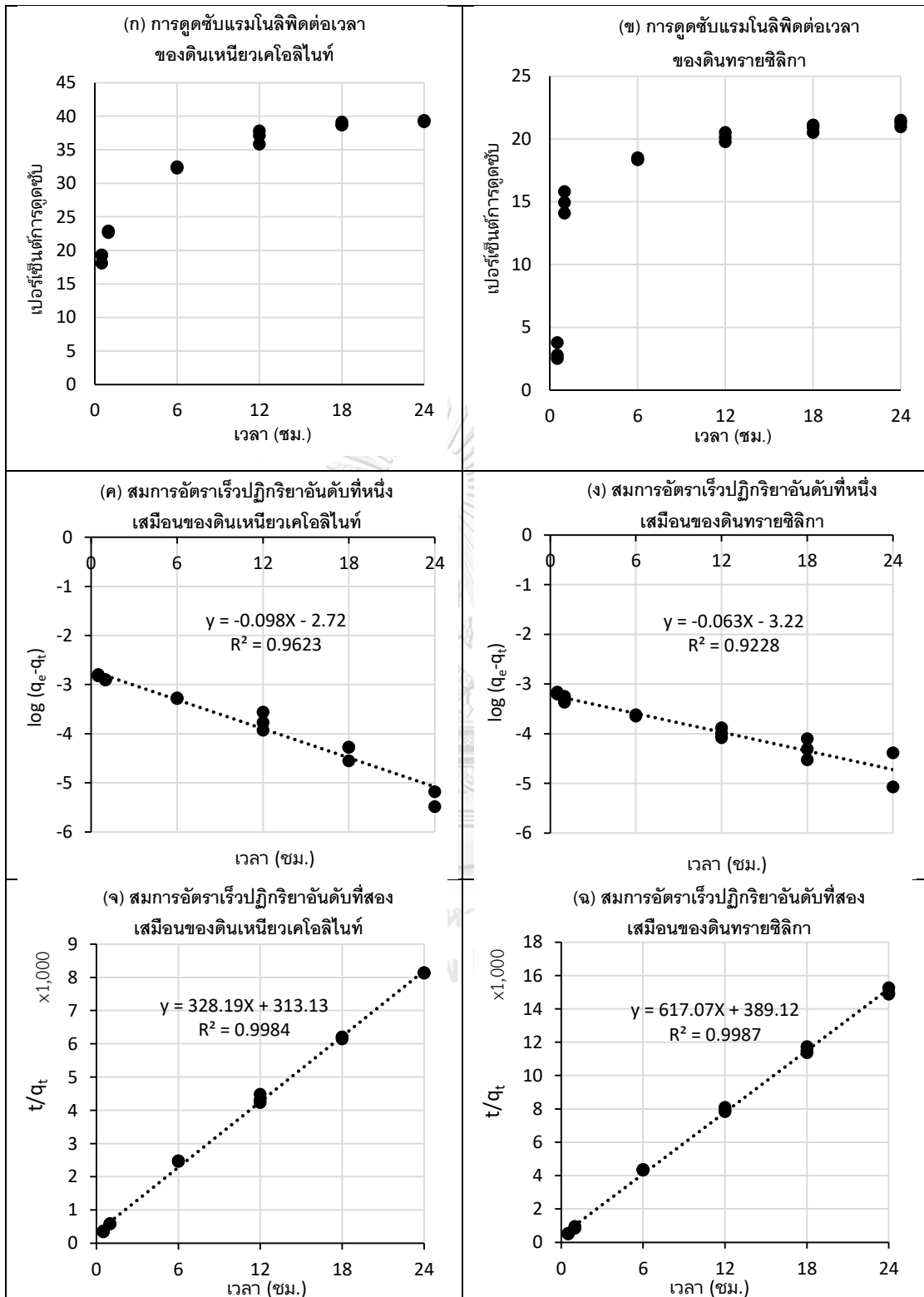
ลำดับ	รายการ	แลงเมียร์ไอโซเทอม	ฟรุนดิชไอโซเทอม
<b>ดินเหนียวเคลโอไลน์ท์</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = 8.55X + 5.02$	$y = 0.77X - 0.601$
2	สมการไอโซเทอม	$q_e = \frac{0.117C_e}{1 + 0.587C_e}$	$q_e = 0.058C_e^{0.77}$
3	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ $K_L$ (ลิตร/มิลลิโมล)	0.587	-
4	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว $q_m$ (มิลลิโมล/กรัม)	0.1993	-
5	ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (n)	-	1.303
6	ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ $K_F$ (มิลลิโมล/กรัม)(ลิตร/มิลลิโมล) <sup>(1/n)</sup>	-	0.0575
7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.9657	0.9836
8	Chi-Square ( $\chi^2$ )	0.3097	0.0757
<b>ดินทรายซิลิกา</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = 25.29X + 5.35$	$y = 0.79X - 1.61$
2	สมการไอโซเทอม	$q_e = \frac{0.040C_e}{1 + 0.2115C_e}$	$q_e = 0.025C_e^{0.79}$
3	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ $K_L$ (ลิตร/มิลลิโมล)	0.2115	-
4	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว $q_m$ (มิลลิโมล/กรัม)	0.1870	-
5	ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (n)	-	1.274
6	ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ $K_F$ (มิลลิโมล/กรัม)(ลิตร/มิลลิโมล) <sup>(1/n)</sup>	-	0.097
7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.9957	0.9696
8	Chi-Square ( $\chi^2$ )	0.0066	0.0468

## 1.2) จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง พบว่า ความเร็วในการดูดซับแรมโนลิพิทของดินเหนียวเคโอลิไนท์ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือนมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9623 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.5758 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9984 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.1578 พบว่า ดินเหนียวเคโอลิไนท์มีความเร็วในการดูดซับแรมโนลิพิทสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมากกว่าสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือน อีกทั้งผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิทที่สมดุลของเคโอลิไนท์ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมีค่า เท่ากับ  $3.05 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งเท่ากับ  $2.96 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.91 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแรมโนลิพิทเท่ากับ 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ดินเหนียวเคโอลิไนท์จะดูดซับแรมโนลิพิทและเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง และมีอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับเท่ากับ  $3.19 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม-ชั่วโมง

ส่วนผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินทรายซิลิกา พบว่า ความเร็วในการดูดซับแรมโนลิพิทของดินทรายซิลิกาตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือนมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9228 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.7975 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9987 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.1226 พบว่า ดินทรายซิลิกามีความเร็วในการดูดซับแรมโนลิพิทสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมากกว่าสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือน อีกทั้งผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิทที่สมดุลของดินทรายซิลิกาตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนมีค่า เท่ากับ  $1.62 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งเท่ากับ  $1.61 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $6.04 \times 10^{-4}$  มิลลิโมลต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิกเท่ากับ 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ดินทรายซิลิกาจะดูดซับแรมโนลิพิทและเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 16 นาที และมีอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับเท่ากับ  $2.57 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัม-ชั่วโมง

รายละเอียดการศึกษาการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่างแสดงดังภาคผนวก ข ส่วนกราฟเส้นตรงของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเหมือนและสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนแสดงดังภาพที่ 30 ซึ่งสามารถสรุปสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทของดินทั้ง 2 ประเภท ได้ดังตารางที่ 14



ภาพที่ 30 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแรมโนลิฟิตบนดินตัวอย่าง

ตารางที่ 14 สรุปสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิคบนดินตัวอย่าง

ลำดับ	รายการ	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา อันดับที่หนึ่งเสมือน	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา อันดับที่สองเสมือน
<b>ดินเหนียวเคโอลิไนท์</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = -0.098X - 2.72$	$y = 328.19X + 313.13$
2	สมการจลนพลศาสตร์	$dq_t/dt = 0.23(1.91 \times 10^{-3} - q_t)$	$dq_t/dt = 343.30(3.19 \times 10^{-3} - q_t)^2$
3	สมการอินทิเกรตของจลนพลศาสตร์	$q_t = 1.91 \times 10^{-3} - 10^{-0.098t-2.72}$	$q_t = 3.05 \times 10^{-3}t/t + 0.954$
4	ความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิคที่ สมดุล ( $q_e$ ) (มิลลิโมล/กรัม)	$1.91 \times 10^{-3}$	$3.05 \times 10^{-3}$
5	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 1 ( $k_1$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	0.2266	-
6	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 2 ( $k_2$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	-	343.30
7	อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้น (h) (มิลลิโมล/ กรัม-ชั่วโมง)	-	$3.19 \times 10^{-3}$
8	ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ ( $t_{1/2}$ ) (นาที)	-	58
9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.9623	0.9984
10	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.5758	0.1578
<b>ดินทรายซิลิกา</b>			
1	สมการเส้นตรง	$y = -0.063X - 3.22$	$y = 617.07X + 389.12$
2	สมการจลนพลศาสตร์	$dq_t/dt = 0.14(6.04 \times 10^{-4} - q_t)$	$dq_t/dt = 979.24(1.62 \times 10^{-3} - q_t)^2$
3	สมการอินทิเกรตของจลนพลศาสตร์	$q_t = 6.04 \times 10^{-4} - 10^{-0.063t-3.22}$	$q_t = 1.62 \times 10^{-3}t/t + 0.631$
4	ความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิคที่ สมดุล ( $q_e$ ) (มิลลิโมล/กรัม)	$6.04 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-3}$
5	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 1 ( $k_1$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	0.1444	-
6	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 2 ( $k_2$ ) (ชม. <sup>-1</sup> )	-	979.24
7	อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้น (h) (มิลลิโมล/ กรัม-ชั่วโมง)	-	$2.57 \times 10^{-3}$
8	ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ ( $t_{1/2}$ ) (นาที)	-	38
9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )	0.9228	0.9987
10	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.7975	0.1226

## 2) ผลการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดิน

ผลการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดินพบว่าที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.72 และจะเริ่มตกตะกอนที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 5.77 และค่าพีเอชในช่วงที่เป็นต่างไม่พบการตกตะกอนแต่อย่างใด ส่วนเพอร์ริกคลอไรด์มีค่าพีเอชเป็นกรดอย่างแรง มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.09 และตกตะกอนในช่วงพีเอชที่เป็นต่าง ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 – 200 ไมโครลิตร ค่าพีเอชของเพอร์ริกคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อยู่ในช่วง 2.24 – 2.73 เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร พบว่าค่าพีเอชเปลี่ยนเป็น 12.09 และมีการตกตะกอนเกิดขึ้นปริมาณมาก

นอกจากนี้ที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร เมื่อผสมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดกับเพอร์ริกคลอไรด์ พบว่าเกิดการตกตะกอนในทุกกรณี ซึ่งจากการผสมแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ในปริมาตรชนิดละ 2.5 มิลลิลิตร พบว่ามีค่าพีเอชของสารผสมอยู่ในช่วง 2.49 – 2.61 โดยที่สารผสมมีลักษณะเป็นสีส้มขุ่นและมีตะกอนที่ก้นหลอดเล็กน้อย เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 – 200 ไมโครลิตร พบว่าที่ค่าพีเอชที่เป็นต่างมากขึ้นปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าลำดับการเติมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์มีผลต่อการตกตะกอนของสารผสม ในกรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดก่อน พบว่าในช่วงค่าพีเอช 9.27 – 10.90 สารผสมมีลักษณะเป็นสีส้มใสและมีตะกอนสีส้มเกิดขึ้น ส่วนกรณีที่เติมเพอร์ริกคลอไรด์ก่อน พบว่าในช่วงค่าพีเอช 7.58 – 10.75 สารผสมมีลักษณะใสไม่มีสีและมีตะกอนสีส้มเกิดขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดก่อนเพอร์ริกคลอไรด์ สารลดแรงตึงผิวเกิดการกระจายตัวในสารละลายอย่างทั่วถึง เมื่อเติมเพอร์ริกคลอไรด์ตามลงไปสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดจะสามารถรวมตัวกับเพอร์ริกบางส่วนได้ จึงไม่ทำให้เกิดการตกตะกอนมากเท่ากับการเติมสารลดแรงตึงผิวทีหลัง ซึ่งสังเกตได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดก่อนเพอร์ริกคลอไรด์จะมีค่าพีเอชเท่ากับ 2.73 ซึ่งมากกว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวทีหลังซึ่งมีค่าพีเอชของสารผสมเท่ากับ 2.49 อีกด้วย เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวยังไม่เกิดการกระจายตัวทำให้แรมโนลิพิดที่ยังกระจุกตัวตกตะกอนเนื่องจากพีเอชที่เป็นกรดแก่ของเพอร์ริกคลอไรด์โดยทันที เมื่อเพิ่มค่าพีเอชโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้เพอร์ริกคลอไรด์ตกตะกอนตามมา ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 15 และภาพที่ 31

สารล้างดินที่ใช้ในการล้างดิน ใช้สารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งผลการศึกษาการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า ไม่สามารถสังเกตผลการตกตะกอนได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายมีค่าต่ำมากจึงไม่สามารถสังเกตการตกตะกอนได้ โดยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด เพอร์ริกคลอไรด์และสารผสมมีลักษณะใสไม่มีสี ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.20 ส่วนเพอร์ริกคลอไรด์มีค่าพีเอชเป็นกรดอ่อน มีค่าพีเอชเท่ากับ



6.12 และสารผสมแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ พบว่า กรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดก่อนมีค่าพีเอชของสารผสมเท่ากับ 6.53 ซึ่งมากกว่ากรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดทีหลัง ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.31 โดยผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 16 และภาพที่ 32




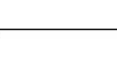

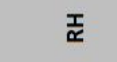





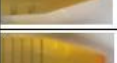







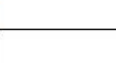







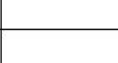




ทั้งนี้การศึกษาสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้นแตกต่างกัน 2 ค่านี้ เนื่องจากที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ไม่สามารถสังเกตผลการตกตะกอนได้ด้วยตาเปล่า จึงได้ทำการศึกษาที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร เพิ่มเติม แม้ค่าความเข้มข้นดังกล่าวไม่ใช่ค่าความเข้มข้นที่ใช้ศึกษาการล้างดิน แต่ทำการทดลองเพื่อสังเกตความเป็นไปได้เบื้องต้นในการนำสารล้างดินที่ค่าพีเอชต่างๆ ไปใช้ในการทดลองการล้างดิน ซึ่งสารล้างดินที่นำมาใช้ในการทดลองล้างดินจะเป็นสารล้างดินที่มีความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร และมีค่าพีเอชเท่ากับ 11 ซึ่งได้ทำการศึกษาการตกตะกอนโดยการกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน (ดูผลการทดลองเพิ่มใน 4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3 หัวข้อ 2) ผลการเตรียมสารล้างดิน)



ตารางที่ 15 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร

ลำดับ	รายการ	แรมโน	เฟอร์ริก	ความเข้มข้น	HCl	NaOH	pH	การ
		ลิพิด	คลอไรด์					
		ml	ml	mM/L	0.5M (μl)	0.5M (μl)		ตกตะกอน
1	RH	5	-	10	200	-	2.86	✓
2	RH	5	-	10	150	-	3.39	✓
3	RH	5	-	10	100	-	5.77	✓
4	RH	5	-	10	50	-	6.72	✗
5	RH	5	-	10	-	-	8.72	✗
6	RH	5	-	10	-	50	10.77	✗
7	RH	5	-	10	-	100	11.23	✗
8	RH	5	-	10	-	150	11.56	✗
9	RH	5	-	10	-	200	12.09	✗
10	FC	-	5	10	200	-	1.71	✗
11	FC	-	5	10	150	-	1.79	✗
12	FC	-	5	10	100	-	1.87	✗
13	FC	-	5	10	50	-	1.99	✗
14	FC	-	5	10	-	-	2.09	✗
15	FC	-	5	10	-	50	2.24	✗
16	FC	-	5	10	-	100	2.29	✗
17	FC	-	5	10	-	150	2.37	✗
18	FC	-	5	10	-	200	2.49	✗
19	FC	-	5	10	-	500	12.12	✓
20	RH+FC	2.5	2.5	10	-	-	2.73	✓
21	RH+FC	2.5	2.5	10	-	50	3.54	✓
22	RH+FC	2.5	2.5	10	-	100	6.97	✓
23	RH+FC	2.5	2.5	10	-	150	9.27	✓
24	RH+FC	2.5	2.5	10	-	200	10.90	✓
25	FC+RH	2.5	2.5	10	-	-	2.49	✓
26	FC+RH	2.5	2.5	10	-	50	2.98	✓
27	FC+RH	2.5	2.5	10	-	100	6.65	✓
28	FC+RH	2.5	2.5	10	-	150	7.58	✓
29	FC+RH	2.5	2.5	10	-	200	10.75	✓

หมายเหตุ: FC คือ สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ และ RH คือ สารละลายแรมโนลิพิด

สาร ล้างดิน	ค่าพีเอช											
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00
	ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร											
RH												
FC												
RH+FC												
FC+RH												

หมายเหตุ: FC คือ สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ และ RH คือ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์





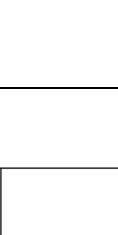









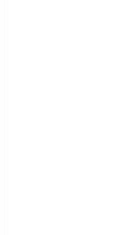
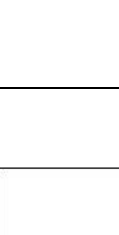












\* ภาพดังกล่าวถูกถ่ายในขณะที่ตะกอนเพิ่ง จึงดูเหมือนมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นมากกว่าหลอดอื่น

ภาพที่ 31 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร

ตารางที่ 16 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร

ลำดับ	รายการ	แรมโน	เฟอร์ริก	ความเข้มข้น	HCl	NaOH	pH	การ ตกตะกอน
		ลิพิด	คลอไรด์		0.5M (μl)	0.5M (μl)		
		ml	ml	mM/l				
1	RH	5	-	0.05	200	-	2.17	✗
2	RH	5	-	0.05	150	-	2.28	✗
3	RH	5	-	0.05	100	-	2.38	✗
4	RH	5	-	0.05	50	-	2.41	✗
5	RH	5	-	0.05	-	-	7.20	✗
6	RH	5	-	0.05	-	50	9.28	✗
7	RH	5	-	0.05	-	100	10.58	✗
8	RH	5	-	0.05	-	150	11.22	✗
9	RH	5	-	0.05	-	200	11.43	✗
10	FC	-	5	0.05	200	-	2.11	✗
11	FC	-	5	0.05	150	-	2.18	✗
12	FC	-	5	0.05	100	-	4.26	✗
13	FC	-	5	0.05	50	-	4.56	✗
14	FC	-	5	0.05	-	-	6.12	✗
15	FC	-	5	0.05	-	50	7.26	✗
16	FC	-	5	0.05	-	100	8.63	✗
17	FC	-	5	0.05	-	150	10.22	✗
18	FC	-	5	0.05	-	200	10.85	✗
19	RH+FC	2.5	2.5	0.05	-	-	6.53	✗
20	RH+FC	2.5	2.5	0.05	-	50	11.71	✗
21	RH+FC	2.5	2.5	0.05	-	100	11.73	✗
22	RH+FC	2.5	2.5	0.05	-	150	11.83	✗
23	RH+FC	2.5	2.5	0.05	-	200	11.98	✗
24	FC+RH	2.5	2.5	0.05	-	-	6.31	✗
25	FC+RH	2.5	2.5	0.05	-	50	11.65	✗
26	FC+RH	2.5	2.5	0.05	-	100	11.69	✗
27	FC+RH	2.5	2.5	0.05	-	150	11.72	✗
28	FC+RH	2.5	2.5	0.05	-	200	11.86	✗

หมายเหตุ: FC คือ สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ และ RH คือ สารละลายแรมโนลิพิด

สาร ล้างดิน	ค่าพีเอช										
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00
	ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร										
RH											
	2.17/2.28/2.38/2.41					7.16	9.28	10.58	11.22/11.43		
FC											
	2.11/2.18			4.26/4.56		6.12	7.26	8.63	10.22/10.85		
RH+FC											
						6.53					11.71/11.73/11.83/11.98
FC+RH											
						6.31					11.65/11.69/11.72/ 11.86

หมายเหตุ: FC คือ สารละลายเพอร์ริคคโลไรต์ และ RH คือ สารละลายแอมโมเนียมไนเตรด

ภาพที่ 32 ผลการทดลองการตกตะกอนของสารล้างดินที่ค่าความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร

### 4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3: ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน

#### 1) ผลการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนต

การเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนตด้วยการผสมดินตัวอย่าง 1 กรัม กับสารละลายโซเดียมอาร์เซนต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 วัน ผลการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนตพบว่าดินเหนียวเคโอลิไนท์ดูดซับอาร์เซนตได้ 80.25 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน โดยมีปริมาณอาร์เซนตที่ไม่ถูกดูดซับ 19.72 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการล้างดินด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที และมีปริมาณอาร์เซนตที่สูญหายจากระบบเท่ากับ 0.031 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน หรือร้อยละ 0.031 โดยมวล ส่วนดินทรายซิลิกาดูดซับอาร์เซนตได้ 29.19 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน โดยมีปริมาณอาร์เซนตที่ไม่ถูกดูดซับ 70.665 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน และมีปริมาณอาร์เซนตที่สูญหายจากระบบเท่ากับ 0.145 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน หรือร้อยละ 0.145 โดยมวล ผลการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนตแสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการเตรียมดินปนเปื้อนอาร์เซนต

รายการ	ดินเหนียวเคโอลิไนท์	ดินทรายซิลิกา
ปริมาณอาร์เซนตเริ่มต้น (mg.As/kg.soil)	100	100
ปริมาณอาร์เซนตที่ได้จากการล้างน้ำกลั่น (mg.As/kg.soil)	19.719	70.665
ปริมาณอาร์เซนตที่ถูกดูดซับ (mg.As/kg.soil)	80.250	29.190
ปริมาณอาร์เซนตที่สูญหาย (mg.As/kg.soil)	0.031	0.145

#### 2) ผลการเตรียมสารล้างดิน

ผลการเตรียมสารล้างดินที่ใช้สำหรับการทดลองทั้ง 4 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่น สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร สารละลายแรมโนลิพิต ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร และสารละลายแรมโนลิพิตผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร เมื่อนำสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด กรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน พร้อมตรวจสอบความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวแรมโนลิพิตด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer) และตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma) พบว่าสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด ไม่เกิดการตกตะกอนและมีความเข้มข้นเป็นไปตามที่เตรียมไว้

### 3) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อน

ผลการล้างดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาที่ปนเปื้อนอาร์เซนต ซึ่งมีปริมาณอาร์เซนตปนเปื้อนเริ่มต้นเท่ากับ 80.25 และ 29.19 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ พบว่า เมื่อนำดินดังกล่าวมาล้างด้วยสารล้างดิน 4 ชนิด ประกอบด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร สารละลายแรมโนลิพิต ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร และสารละลายแรมโนลิพิตผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งสารล้างดินทั้งหมดปรับพีเอชเป็น 11 ด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า สารล้างดินแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินทั้งสองประเภทแตกต่างกัน โดยสารละลายแรมโนลิพิต ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร สามารถกำจัดอาร์เซนตออกจากดินเหนียวเคโอลิไนท์ได้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 63.36 โดยมวล หรือ 50.75 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน ที่เวลาล้างดิน 20 ชั่วโมง ส่วนกรณีดินทรายซิลิกาสารล้างดินที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดอาร์เซนตคือ สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดอาร์เซนตออกได้มากที่สุดร้อยละ 93.63 โดยมวล หรือ 27.30 มิลลิกรัมอาร์เซนตต่อกิโลกรัมดิน ที่เวลาล้างดิน 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ผลการทดลองการล้างดินปนเปื้อนอาร์เซนตด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตารางที่ 18 ภาพที่ 33 และภาพที่ 34 และปริมาณอาร์เซนตที่คงเหลือในดินหลังการล้างดินเทียบกับมาตรฐานคุณภาพดินของกรมควบคุมมลพิษ แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 18 ผลการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินตัวอย่างด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ประเภท

ประเภทดิน และสารล้างดิน	ปริมาณอาร์เซนตที่กำจัดได้ (mg.As/kg.Soil)						ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนต (%)					
	เวลาล้างดิน (ชั่วโมง)											
	4	8	12	16	20	24	4	8	12	16	20	24
<b>ดินเหนียวเคโอลิไนท์</b>												
DW	18.42	21.10	25.01	29.83	29.67	43.63	23.00	31.23	37.24	37.04	54.47	
FC	28.37	34.08	31.42	34.74	47.84	35.88	35.42	42.55	39.23	43.37	59.72	44.79
RH	34.58	35.38	38.50	44.12	50.75	39.38	43.17	44.17	48.07	55.08	63.36	49.16
Rh-FC	21.07	22.49	21.72	26.08	19.33	18.25	26.30	28.08	27.12	32.56	24.13	22.79
<b>ดินทรายซิลิกา</b>												
DW	5.77	7.63	5.63	5.85	6.95	8.61	19.78	26.15	19.32	20.06	23.83	29.54
FC	27.30	27.07	24.39	24.41	25.37	26.38	93.63	92.85	83.64	83.71	86.99	90.46
RH	25.12	24.54	21.45	23.46	21.90	20.18	86.14	84.17	73.57	80.44	75.10	69.21
RH-FC	21.54	21.92	20.36	20.20	20.43	20.56	73.88	75.18	69.82	69.26	70.06	70.50

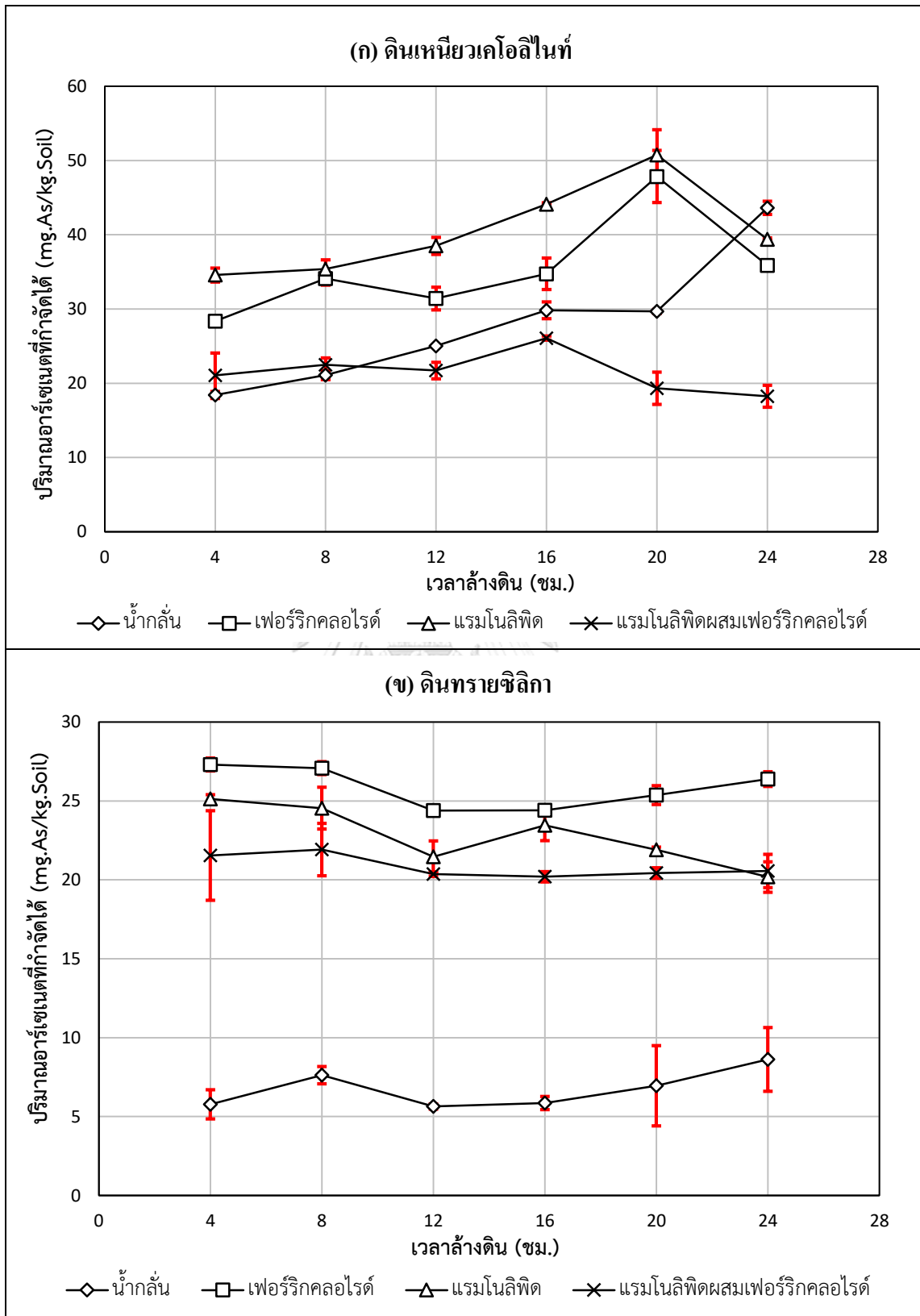
หมายเหตุ: DW คือ น้ำกลั่น, FC คือ สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร, RH คือ สารละลายแรมโนลิพิต ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร, RH-FC คือ สารละลายแรมโนลิพิตผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร

ตารางที่ 19 ปริมาณอาร์เซนิตที่คงเหลือในดินหลังการล้างดินเทียบกับมาตรฐานคุณภาพดินของกรมควบคุมมลพิษ

รายการ	ปริมาณอาร์เซนิตที่คงเหลือในดิน (มก./กก.)					
	เวลาล้างดิน (ชม.)					
	4	8	12	16	20	24
<b>ดินเหนียวเคโอลิไนท์ (ปริมาณอาร์เซนิตปนเปื้อนเริ่มต้น = 80.25 มก./กก.)</b>						
DW	61.83	59.15	55.24	50.42	50.58	36.62
FC	51.88	46.17	48.83	45.51	32.41	44.37
RH	45.67	44.87	41.75	36.13	29.50	40.87
Rh-FC	59.18	57.76	58.53	54.17	60.92	62.00
<b>ดินทรายซิลิกา (ปริมาณอาร์เซนิตปนเปื้อนเริ่มต้น = 29.19 มก./กก.)</b>						
DW	23.42	21.56	23.56	23.34	22.24	20.58
FC	1.89	2.12	4.8	4.78	3.82	2.81
RH	4.07	4.65	7.74	5.73	7.29	9.01
RH-FC	7.65	7.27	8.83	8.99	8.76	8.63

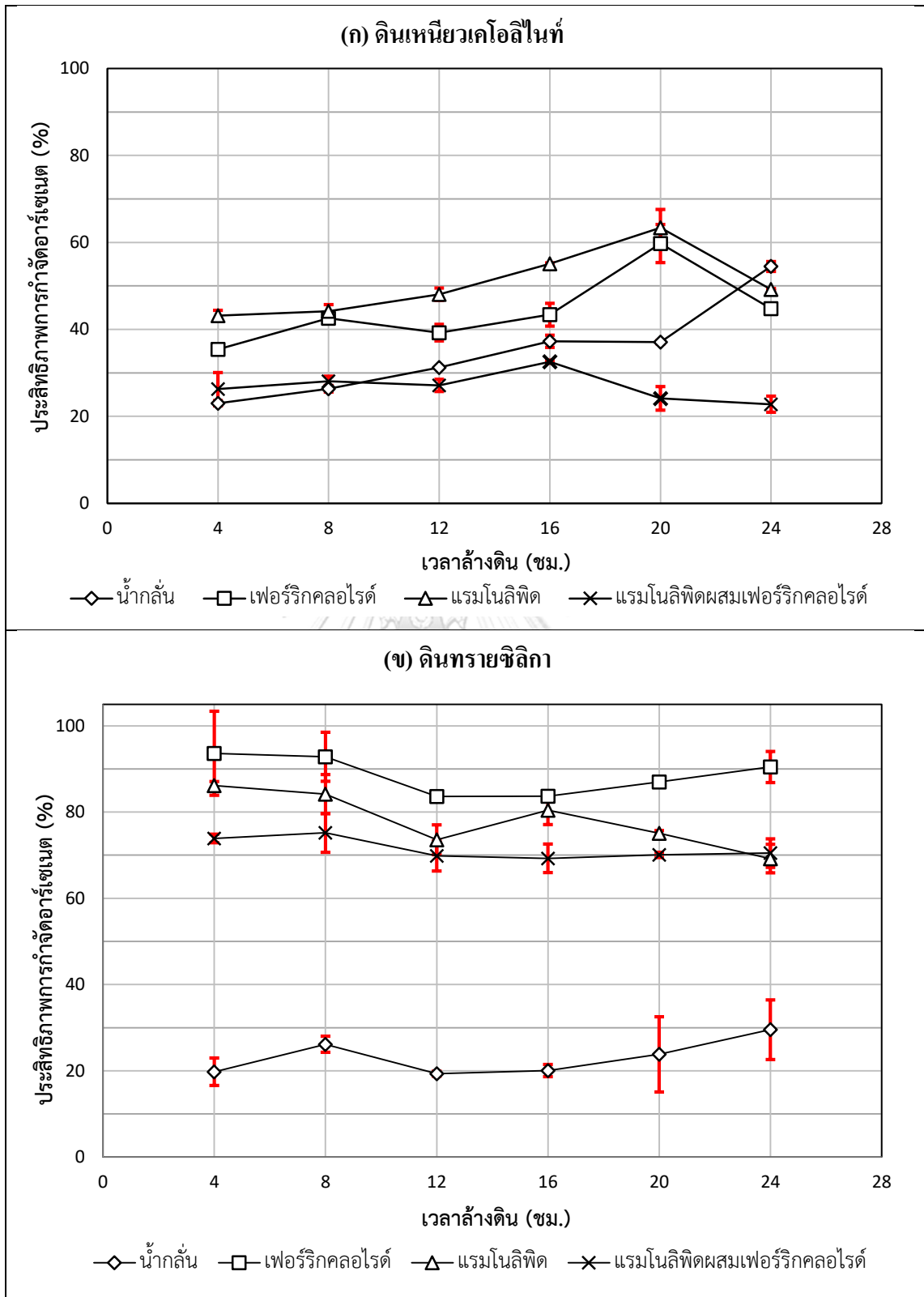
- หมายเหตุ**
- ผ่านมาตรฐานการใช้ดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (< 3.9 มก./กก.) ของกรมควบคุมมลพิษ
  - ผ่านมาตรฐานการใช้ดินเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (< 27.0 มก./กก.) ของกรมควบคุมมลพิษ
  - ไม่ผ่านมาตรฐาน ( $\geq 27.0$  มก./กก.) ของกรมควบคุมมลพิษ





ภาพที่ 33 ผลการศึกษาปริมาณอาร์เซนดที่ถูกกำจัดของสารล้างดินแต่ละชนิด

(ก) ดินเหนียวเคโอลิไนท์ (ข) ดินทรายซิลิกา



ภาพที่ 34 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิตของสารล้างดินแต่ละชนิด

(ก) ดินเหนียวเคโอลิไนท์ (ข) ดินทรายซิลิกา

จากตารางที่ 18 ภาพที่ 33 และภาพที่ 34 สามารถอธิบายผลการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาได้ดังนี้

- กรณีที่ใช้ น้ำกลั่น เป็นสารล้างดิน พบว่า น้ำกลั่นมีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาได้สูงสุดร้อยละ 54.47 และ 29.54 โดยมวล ตามลำดับ ที่เวลาการล้างดิน 24 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตด้วยน้ำกลั่นขึ้นกับเวลาในการล้างดิน จากช่วงเริ่มล้างดินจนถึงเวลา 20 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาล้างดินเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยกระบวนการที่เกี่ยวข้องในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินด้วยน้ำกลั่นนี้เกิดจากความเปียก (Wettability) และการสัมผัสระหว่างดินกับน้ำกลั่น (Contraction) นอกจากนี้ค่าพีเอชของสารล้างดินที่มีความเป็นเบสสูง (พีเอช 11) ยังส่งผลให้ประจุบนผิวของดินทั้งสองชนิดมีความเป็นลบมากยิ่งขึ้น จึงก่อให้เกิดแรงผลักโมเลกุลของอาร์เซนตออกจากผิวดิน
- กรณีที่ใช้ สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมล เป็นสารล้างดิน พบว่า เพอร์ริกสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับอาร์เซนตและทำให้อาร์เซนตคายการดูดซับจากดินได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาได้สูงสุดร้อยละ 59.72 และ 93.63 โดยมวล ตามลำดับ ทั้งนี้การรวมตัวของเพอร์ริกและอาร์เซนตถือเป็นสารละลายเนื่องจากสามารถผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน ได้ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตด้วยสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ของดินเหนียวอาร์เซนตเกิดขึ้นสูงสุดที่เวลาล้างดิน 20 ชั่วโมง ส่วนกรณีของดินทรายซิลิกาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตไม่ขึ้นกับเวลาล้างดิน โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดอาร์เซนตเกิดขึ้นที่เวลา 4 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนตใกล้เคียงเต็มไปจนครบเวลาล้างดิน 24 ชั่วโมง ดังนั้นแล้วระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการล้างดินทรายซิลิกาการด้วยสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมล คือเวลาไม่เกิน 4 ชั่วโมง
- กรณีที่ใช้ สารละลายแรมโนลิพิต ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมล เป็นสารล้างดิน พบว่า สารละลายแรมโนลิพิตมีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนตออกจากดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาได้สูงสุดร้อยละ 63.36 และ 86.14 โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งกลไกในการกำจัดอาร์เซนตด้วยสารลดแรงดึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิตประกอบไปด้วยหลายกลไก เช่น การลดแรงดึงผิวระหว่างเฟสของเหลวและดิน การเพิ่มความสามารถในการเปียก (Wettability) และการแทนที่ประจุลบ (Anion replacement) ทั้งนี้พบว่ากรณีของดินเหนียวเคโอลิไนท์ซึ่งสามารถดูดซับแรมโนลิพิตได้ดีกว่ามีแนวโน้มที่จะกำจัดอาร์เซนตด้วยสารละลายแรมโนลิพิตได้ดีกว่าดินทรายซิลิกาซึ่งดูดซับแรมโนลิพิตได้น้อยกว่า ซึ่งการดูดซับของแรมโนลิพิตเป็นกลไกหลักหนึ่งที่ทำให้อาร์เซนตเกิดการคายการดูดซับ โดยการดูดซับแรมโนลิพิตซึ่งมีประจุลบบนดินจะช่วยเพิ่มค่าประจุลบของศักย์ซีตา (Negative zeta potential) ของดินเป็นผลให้อาร์เซนตซึ่งมีประจุเป็นลบเช่นกันถูกกำจัดออกจาก

ดินมากขึ้น เนื่องจากแรงผลักประจุ ในกรณีของดินเหนียวเคโอลิไนท์ การคายการดูดซับของ อาร์เซนเตชันกับเวลา โดยจากช่วงเริ่มต้นถึง 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตค้อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาล้างดิน 16 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่เวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นลดลงที่เวลาล้างดิน 24 ชั่วโมง ส่วนกรณีดินทรายซิลิกาการใช้สารลดแรงดึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทเป็นสารล้างดินให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่เวลาล้างดิน 4 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มเวลาล้างดินประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตลดลงตามเวลาล้างดิน เนื่องมาจากเกิดการดูดซับอาร์เซนเตซ้ำอีกครั้ง (Re-adsorption) จากผลการทดลองการดูดซับของแรมโนลิพิทกับดินทรายซิลิกาพบว่าดินทรายซิลิกาดูดซับแรมโนลิพิทแบบชั้นเดียวและดูดซับแรมโนลิพิทได้ปริมาณน้อย ดังนั้นแล้วในกรณีของดินทรายซิลิกาแม้ว่าแรมโนลิพิทจะสามารถแทนที่ประจุลบของ อาร์เซนเตได้ แต่เมื่อเวลาล้างดินนานขึ้นแรมโนลิพิทจะคายการดูดซับเป็นผลให้อาร์เซนเตกลับมาดูดซับกับดินทรายซิลิกาได้อีกครั้ง ดังนั้นแล้วการใช้สารลดแรงดึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทเป็นสารล้างดินเพียงอย่างเดียวต้องควบคุมเวลาล้างดินเป็นอย่างดี จึงได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดอาร์เซนเต

- กรณีที่ใช้สารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร เป็นสารล้างดิน พบว่า การใช้สารละลายผสมนี้มีแนวโน้มที่ดีในการป้องกันไม่ให้อาร์เซนเตเกิดการดูดซับซ้ำ (Re-adsorption) ในกรณีของดินเหนียวเคโอลิไนท์ การใช้สารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตสูงสุดร้อยละ 32.56 โดยมวล ที่เวลาล้างดิน 16 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับเวลาล้างดินที่ 24 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตลดลงร้อยละ 9.77 โดยมวล ในขณะที่การใช้สารละลายแรมโนลิพิทและเพอร์ริกคลอไรด์เพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดกับประสิทธิภาพต่ำสุดที่เวลาหลังจากเกิดประสิทธิภาพสูงสุดมี ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตลดลงร้อยละ 14.20 และ 14.93 โดยมวล ตามลำดับ ส่วนกรณีของดินทรายซิลิกา มีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตเกิดขึ้นสูงสุดร้อยละ 75.18 ที่เวลาล้างดิน 8 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับเวลาล้างดินที่ 24 ชั่วโมงพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตลดลงเพียงร้อยละ 4.68 โดยมวล ในขณะที่การใช้สารละลายแรมโนลิพิทและเพอร์ริกคลอไรด์เพียงอย่างเดียวเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดกับประสิทธิภาพต่ำสุดที่เวลาหลังจากเกิดประสิทธิภาพสูงสุดมี ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตลดลงร้อยละ 16.93 และ 9.99 ตามลำดับ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนเตที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการใช้สารล้างดินชนิดอื่น โดยเฉพาะกรณีดินเหนียวเคโอลิไนท์เนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างสะพานเชื่อมโลหะ (Metal bridging mechanism) ต้องใช้แรมโนลิพิทต่อเพอร์ริกต่ออาร์เซนเตที่อัตรา 4:2:1 ทำให้สารละลายที่เตรียมไว้มีเพอร์ริกอิสระ 0.025 มิลลิโมลต่อลิตร และโครงสร้างที่เกิดสะพานเชื่อมโลหะได้เป็นแรมโนลิพิท 0.05 มิลลิโมลต่อลิตรและเพอร์ริกคลอไรด์ 0.025 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งมีศักยภาพในการกำจัดอาร์เซนเตสูงสุดได้เพียง 0.0375 มิลลิโมลต่อลิตรเท่านั้น เมื่อเทียบกับกรณีการใช้สารล้างดินชนิด

อื่นที่มีศักยภาพในการกำจัดอาร์เซนตสูงสุดได้ 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ดังนั้นแล้วโครงสร้างสะพานเชื่อมโลหะเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้กำจัดอาร์เซนตออกจากดินปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมโดยการเพิ่มสัดส่วนปริมาณแรมโนลิพิตอิสระให้มากขึ้น เพื่อให้มีแรมโนลิพิตไปแทนที่อาร์เซนตที่ดูดซับบนผิวดินได้มากขึ้น และทำให้อาร์เซนตหลุดเป็นอิสระและรวมกับโครงสร้างสะพานเชื่อมโลหะได้มากขึ้น

จากตารางที่ 19 พบว่ากรณีดินเหนียวเคโอลิไนท์ซึ่งมีปริมาณอาร์เซนตดูดซับเริ่มต้น 80.25 มก./กก. สามารถกำจัดอาร์เซนตให้คงเหลือในดินได้ต่ำสุด 29.50 มก./กก. ด้วยสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิตที่เวลาล้างดิน 20 ชั่วโมง และ 32.41 มก./กก. ด้วยสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ที่เวลาล้างดิน 20 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด ไม่สามารถลดปริมาณอาร์เซนตให้ผ่านมาตรฐานปริมาณอาร์เซนตที่ปนเปื้อนของกรมควบคุมมลพิษได้เลย ส่วนกรณีดินทรายซิลิกาซึ่งมีปริมาณอาร์เซนตดูดซับเริ่มต้น 29.19 มก./กก. พบว่าสารล้างดินทั้ง 4 ชนิดสามารถลดปริมาณอาร์เซนตให้คงเหลือในดินในปริมาณที่ผ่านมาตรฐานดินเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและการเกษตร ( $< 27.0$ ) ได้ทั้งหมด และในกรณีที่ใช้สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์สามารถลดปริมาณอาร์เซนตให้คงเหลือในดินให้ผ่านมาตรฐานเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรได้ ( $< 3.9$  มก./กก.) ทั้งนี้ นอกเหนือจากปัจจัยด้านประสิทธิภาพแล้วยังต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านราคาอีกด้วย ผลการประเมินราคาสารเคมีเบื้องต้น พบว่า กรณีที่ใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิต จะมีต้นทุนสารเคมีในการบำบัด 76,160 บาท ต่อดิน 1 ตัน กรณีที่ใช้เพอร์ริกคลอไรด์มีต้นทุนสารเคมีในการบำบัด 4,622 บาท ต่อดิน 1 ตัน และกรณีที่ใช้แรมโนลิพิตผสมเพอร์ริกคลอไรด์มีต้นทุนสารเคมีในการบำบัด 80,782 บาท ต่อดิน 1 ตัน ดังนั้นแล้วการใช้สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์เป็นสารล้างดินสำหรับดินทั้ง 2 ประเภท จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดทั้งด้านประสิทธิภาพและด้านราคา ทั้งนี้รายละเอียดการประเมินราคาสารเคมีในการบำบัดแสดงดังภาคผนวก ข

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดอาร์เซนเนตจากดินปนเปื้อนเทียม 2 ประเภท คือ ดินเหนียวเคลโอลิไนท์และดินทรายซิลิกา ด้วยวิธีการล้างดินแบบแบทช์ โดยสารล้างดินที่ใช้ศึกษาประกอบไปด้วย น้ำกลั่น สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ สารละลายแรมโนลิพิด และสารละลายแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลอง ได้แก่ การทดลองช่วงที่ 1 ขั้นตอนการศึกษาดินตัวอย่าง การทดลองช่วงที่ 2 ขั้นตอนการศึกษาสารล้างดิน และการทดลองช่วงที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเนตออกจากดินปนเปื้อน จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การศึกษาดินตัวอย่าง พบว่า ดินเหนียวเคลโอลิไนท์มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าดินทรายซิลิกาด้วยปัจจัยทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมที่มากกว่า ขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า อีกทั้งปัจจัยทางเคมีเช่นค่าพีเอชดินและค่าจุดประจุที่ผิวเป็นศูนย์ยังแสดงให้เห็นอีกว่าดินเหนียวเคลโอลิไนท์มีความแรงประจุลบต่ำกว่าดินทรายซิลิกาจึงมีแนวโน้มในการดูดซับอาร์เซนเนตและแรมโนลิพิดได้ดีกว่า โดยการดูดซับอาร์เซนเนตของดินเหนียวเคลโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชไอโซเทอม ทำให้เกิดการดูดซับอาร์เซนเนตบนผิวดินแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ โดยดินเหนียวเคลโอลิไนท์มีความเร็วในการดูดซับเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนเนต เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดินเหนียวเคลโอลิไนท์จะดูดซับอาร์เซนเนตด้วยความเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ เท่ากับ 0.179 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 7 ชั่วโมง ส่วนดินทรายซิลิกามีความเร็วในการดูดซับอาร์เซนเนตเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนเนต เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดินทรายซิลิกาจะดูดซับอาร์เซนเนตด้วยความเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ เท่ากับ 0.377 มิลลิกรัมต่อกรัมดินต่อชั่วโมง และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 1 ชั่วโมง

การดูดซับแรมโนลิพิดของดินเหนียวเคลโอลิไนท์เป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชไอโซเทอม ทำให้เกิดการดูดซับแรมโนลิพิดบนผิวดินเคลโอลิไนท์เกิดขึ้นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงทางกายภาพ และมีความเร็วในการดูดซับเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแรมโนลิพิด เท่ากับ 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ดินเหนียวเคลโอลิไนท์จะดูดซับแรมโนลิพิดด้วยความเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ เท่ากับ  $3.19 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนการดูดซับแรมโนลิพิดของดินทรายซิลิกาเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ไอโซเทอม การดูดซับแรมโนลิพิดบนผิวดินทรายซิลิกาเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว เท่ากับ 0.187 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และมีความเร็วในการดูดซับเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแรมโนลิพิด เท่ากับ 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร ดินทรายซิลิกาจะดูดซับ

แรมโนลิพิทด้วยความเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ เท่ากับ  $2.57 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อกรัมดินต่อชั่วโมง และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 1 ชั่วโมง 16 นาที

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตตออกจากดินปนเปื้อน พบว่า ฤทธิ์ของดินเหนียวเคลโอลิไนท์ สารละลายแรมโนลิพิทให้ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตตได้ดีที่สุด โดยกลไกในการกำจัดอาร์เซนเตตด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทประกอบไปด้วยหลายกลไก เช่น การลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสของเหลวและดิน การเพิ่มความสามารถในการเปียก (Wettability) และการแทนที่ประจุลบ (Anion replacement) ทั้งนี้พบว่าฤทธิ์ของดินเหนียวเคลโอลิไนท์ซึ่งสามารถดูดซับแรมโนลิพิทได้ดีกว่ามีแนวโน้มที่จะกำจัดอาร์เซนเตตด้วยสารละลายแรมโนลิพิทได้ดีกว่าดินทรายซิลิกาซึ่งดูดซับแรมโนลิพิทได้น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าฤทธิ์ที่ใช้เพอร์ริกคลอไรด์ก็ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีด้วยเช่นกัน โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดต่ำกว่าฤทธิ์ใช้แรมโนลิพิทเพียงร้อยละ 3.64 ส่วนฤทธิ์ของดินทรายซิลิกา สารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเตตได้ดีที่สุด โดยกลไกในการกำจัดอาร์เซนเตตด้วยเพอร์ริกคลอไรด์เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของเพอร์ริกกับอาร์เซนเตตและทำให้อาร์เซนเตตคายการดูดซับจากดิน ทั้งนี้จากการศึกษาการใช้แรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์ซึ่งมีโครงสร้างสะพานเชื่อมโลหะและเพอร์ริกอิสระไม่สามารถใช้กำจัดอาร์เซนเตตออกจากดินปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรศึกษาสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นอื่นเพิ่มเติม เช่น แรมโนลิพิทต่อเพอร์ริกคลอไรด์ 2:1 และ 3:1 โดยโมล เพื่อสังเกตผลฤทธิ์ที่มีแรมโนลิพิทอิสระ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์มีแนวโน้มที่ดีในการป้องกันการดูดซับซ้ำ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปัจจัยทางด้านประสิทธิภาพและราคาสารเคมีประกอบแล้วพบว่าสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำมาใช้งานจริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ฤทธิ์ที่ใช้ดินเกรตวึเคราะห์ ของบริษัทซิกมา-อัลดริช (Sigma-Aldrich) ไม่จำเป็นต้องล้างดินด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินเกรตวึเคราะห์ไม่มีสารอินทรีย์เจือปน

5.2.2 การศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิท ด้วยเครื่องวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมสามารถทำได้ โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแรมโนลิพิทและพื้นที่ใต้กราฟที่เครื่องวัดได้ แต่จำเป็นต้องทำการตรวจสอบปริมาณสารอินทรีย์เจือปนในดินตัวอย่างที่ทำการศึกษา ก่อนการวัดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิทด้วยวิธีดังกล่าว เพื่อไม่ให้ค่าที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน

5.2.3 การเตรียมสารละลายแรมโนลิพิทผสมเพอร์ริกคลอไรด์ควรลำดับการผสมโดยเริ่มจากการใส่สารละลายแรมโนลิพิทแล้วปรับค่าพีเอชเป็น 11 จากนั้นจึงเติมสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์และทำการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 11 อีกครั้งเป็นลำดับสุดท้าย

5.2.4 ควรศึกษาสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นอื่น เช่น แรมโนลิพิดต่อเพอร์ริกคลอไรด์ 2:1 และ 3:1 โดยโมล ที่ความเข้มข้นของแรมโนลิพิดต่ำกว่าจุดวิกฤตของไมเซลล์

5.2.5 ควรศึกษาวิธีการกำจัดอาร์เซนิตด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด ด้วยวิธีอื่นนอกเหนือจากการล้างดิน ด้วยวิธีแบบแบทช์ เช่น การชะดิน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับการบำบัดแบบในพื้นที่ปนเปื้อน (In-situ)

### 5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนอาร์เซนิตในดินเป็นปัญหาที่สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพประชาชนและความมั่นคงของระบบนิเวศ ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อบำบัดดินปนเปื้อนอาร์เซนิตขึ้นหลากหลาย โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์เพื่อกำจัดอาร์เซนิตออกจากดินปนเปื้อน ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงแนวทางในการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดร่วมกับเพอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์เพื่อกำจัดอาร์เซนิตออกจากดินปนเปื้อน โดยเฉพาะกับดินทรายซิลิกาที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อกำจัดอาร์เซนิตได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการดูดซับซ้ำเกิดขึ้นอีกด้วย แต่ในกรณีของดินเหนียวเคโอลิไนท์พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:1 โดยโมล เพื่อกำจัดอาร์เซนิตออกจากดินปนเปื้อนให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าสารล้างดินชนิดอื่น แต่มีการดูดซับซ้ำเกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์เพียงอย่างเดียว รวมทั้งได้ทราบระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดดินเหนียวเคโอลิไนท์และดินทรายซิลิกาปนเปื้อนอาร์เซนิตด้วยสารล้างดินทั้ง 4 ชนิด อยู่ที่เวลาล้างดิน 16 – 20 ชั่วโมง และ 4 – 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนกรณีของน้ำกลั่นประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีประสิทธิภาพสูงสุดที่เวลาล้างดิน 24 ชั่วโมง ซึ่งระยะเวลาในการล้างดินที่มากขึ้นจะส่งผลต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมดินกับสารล้างดินอีกด้วย โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในพื้นที่ปนเปื้อนจริง ซึ่งมักมีขนาดพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่



รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์. 2540 รายงานการศึกษาติดตามปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนู  
อ.ร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวง  
อุตสาหกรรม

### ภาษาอังกฤษ

ASTM international. 1998. Standard test method for particle-size analysis of soils. Designation:  
D 422 – 63

ASTM international. 2010a. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water  
pycnometer. Designation: D 854 – 02

ASTM international. 2010b. Standard test methods for moisture, ash and organic matter of  
peat and other soils. Designation: D2974-00

ASTM international. 2010c. Standard test methods for pH of soils. Designation: D4972-01

ASTM international. 2010d. Standard test method for elements in water by inductive coupled  
plasma-mass spectrometry. Designation: D5673-05

Cao, M., Ye, E., Chen, J. and Lu, X. 2015. Remediation of arsenic contaminated soil by  
coupling oxalate washing with subsequent ZVI/air treatment. Chemosphere. 144:  
1313 -1318

Chen, X. 2015. Modeling of experimental adsorption isotherm data. Information. 6: 14 – 22

Dahrazma, B. and Mulligan, C.N. 2007. Investigation of the removal of heavy metals from  
sediments using rhamnolipid in a continuous flow configuration. Chemosphere. 69:  
705 – 711

Dahrazma, B., Mulligan, C.N. and Nieh, M.P. 2008. Effects of additives on the structure of  
Rhamnolipid (biosurfactant): a small-angle neutron scattering (SANS) study. J.Coll  
Interfac Sci. 319: 590-593.

Elimbi, A., Tchakoute, H.K. and Njopwouo, D. 2010. Effect of calcination temperature of  
kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. Construction and building  
materials. 25: 2805 - 2812

Essington, M.E. 2015. Soil and water chemistry an integrative approach, Second edition. Boca  
Raton, USA: CRC Press

- Fortner, J.D., Solenthaler, C., Hughes, J.B., Puzrin, A.M. and Plotze, M. 2011. Interactions of clay minerals and a layered double hydroxide with water stable, nano scale fullerene aggregates ( $nC_{60}$ ). Applied clay science. 55: 36 – 43
- Im, J., Yang, K., Jho, E.H. and Nam, K. 2015. Effect of different soil washing solutions on bioavailability of residual arsenic in soils and soil properties. Chemosphere. 138: 253 – 258
- International agency for research on cancer (IARC) [Online]. 2012. Arsenic and Arsenic compounds. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/monograph100C-6.pdf> [2016, Nov 1]
- Joong, S., Noh, and Schwaz, J.A. 1988. Estimation of the point of zero charge of simple oxides by mass titration. Journal of colloid and interface science. 130:157-164
- Kapp, R.W. Jr. 2016. Arsenic: properties and determination. Encyclopedia of food and health. 249-255
- Liao, X., Li, Y. and Yan, X. 2015. Removal of heavy metals and arsenic from a co-contaminated soil by sieving combined with washing process. Journal of environmental sciences. 41:202-210
- Liang, C., Wang, X. and Peng, X. 2015. Arsenic retention and transport behavior in the presence of typical anionic and nonionic surfactants. Journal of environmental sciences. 39: 249-258
- Lowel, S.L. and Shields, J.E. 1991. Powder surface area and porosity. 3rd ed. London : Chapman & Hall , p. 1-40.
- Mandal, B.K. and Suzuki, K.T. 2002. Arsenic round the world: a review. Toxanta. 58: 201 – 235
- Mao, X., Jinng, R., Xiao, W. and Yu, J. 2014. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: A review. Journal of hazardous materials. 285: 419 – 435
- Mitsui mineral development engineering co, LTD and Kokusai Kogyo co, LTD., 2000. The environmental management planning survey for arsenic contaminated area of the Nakhonsithammarat province in the kingdom of Thailand. Bangkok Thailand: Ministry of science technology and environment.

- Mulligan, C.N. 2009. Recent advances in the environmental applications of biosurfactant. Current Option in colloid & Interface Science. 14:372 – 378
- Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, BF. 1999. On the use of biosurfactants for the removal heavy metal from oil-contaminated soil. Environ Prog. 18:50-54
- Noh, J.S. and Schwarz, J.A. 1988. Estimation of the point of zero charge of simple oxides by mass titration. Journal of colloid and interface science. 130: 157 - 164
- Ochoa-Loza, J.F., Noordman, W.H., Janssen, D.B., Brusseau, M.L. and Maier, R.M. 2006. Effect of clays, metal oxides, and organic matter on rhamnolipid biosurfactant sorption by soil. Chemosphere. 66: 1634 – 1642
- Qasim, S.R., Motley, E.M. and Zhu G. 2000. Water works engineering planning design and operation. United States of America: Prentice hall PTR.
- Rosen, M.J. 2004. Surfactants and interfacial phenomena. 3rd ed. Hoboken, N. J.: Wiley-Interscience.
- Sigma-Aldrich [Online]. 2015a. Sigma-Aldrich safety data sheet of Rhamnolipid. <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=JP&language=ja&productNumber=R90&brand=SIGMA&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Fsigma%2Fr90%3Flang%3Dja> [2016,Nov 1]
- Sigma-Aldrich [Online]. 2015b. Sigma-Aldrich safety data sheet of Ferric Chloride. <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=TH&language=en&productNumber=451649&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fsearch%3Fterm%3Dferric%2Bchloride%26interface%3DAll%26N%3D0%26mode%3Dpartialmax%26lang%3Den%26region%3DTH%26focus%3Dproduct>
- Sigma-Aldrich [Online]. 2015c. Sigma-Aldrich safety data sheet of sodium arsenate dibasic heptahydrate. <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/PleaseWaitMSDSPage.do?language=&country=JP&brand=SIGMA&productNumber=A6756&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fsearch%3Fterm%3D10048-95-0%26interface%3DCAS%2520No.%26N%3D0%26mode%3Dmatch%2520partialmax%26lang%3Dja%26region%3DJP%26focus%3Dproduct> [2016,Nov 1]

- Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V.P. and Prasad, S.M. 2014. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: a review. Ecotoxicology and environmental safety. 112: 247-270
- Satapanajaru, T., Anurakpongatorn, P., Pengthamkeerati, P. and Boparai, H. 2008. Remediation of atrazine contaminated soil and water by nano zerovalent iron. Published online at DOI 10.1007/s11270-008-9661-8
- Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.). 1996. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods .SSSA, Madison, WI
- Torres, L.G., Lopez, R.B. and Beltran. 2011. Removal of As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from highly contaminated industrial soil using surfactant enhanced soil washing. Physics and chemistry of the earth. 30 – 36
- United States Department of Agriculture. 1993. Soil survey manual, Washington,DC: U.S. Government printing office
- US-EPA. 1990. Method 3052 Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices.
- Visoottiviseth, P., Francesconi, K. and Sridokchan, W. 2001. The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. Environmental Pollution. 118: 453 – 461
- Wan, N. Kamari, A. and Koay, Y.J. 2004. Equilibrium and kinetics studies of adsorption of copper(II) on chitosan and chitosan/PVA beads. International journal of biological macromolecules. 34: 155 - 161
- Wang, S. and Mulligan, C.N. 2004. Rhamnolipid foam enhanced remediation of cadmium and nickel contaminated soil. Water Air Soil Pollut. 157: 315 – 330
- Wang S. and Mulligan, C.N. 2008. Rhamnolipid biosurfactant-enhanced soil flushing for the removal of arsenic and heavy metals from mine tailings. Process biochemistry. 44: 296 – 301
- Wang S. and Mulligan, C.N. 2009. Arsenic mobilization from mine tailings in the presence of biosurfactant. Applied geochemistry. 24: 928 – 935

World Health Organization (WHO). 2005. Bentonite Kaolin and selected clay minerals. Environmental health criteria. :231

Yao, Z., Li, J., Xie, H. and Yu, C. 2012. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. Procardia environmental sciences. 16: 722 - 729









### ก-1 การคำนวณไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง

#### 1) การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ )

$$q_e = X/M$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$X$	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$M$	=	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตที่สมดุลของดินเหนียวเคโอลิไนท์

$$q_e = 0.013 / 0.1010$$

$$= 0.130 \quad \text{มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

#### 2) การวิเคราะห์สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอม

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$q_m$	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$K_L$	=	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
	$C_e$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่หลังสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์สามารถจัดภาพให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$$

เมื่อนำข้อมูลสมการข้างต้นมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/q_e$  และ  $1/C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถใช้คำนวณค่า  $K_L$  และ  $q_m$  จากค่าความชันเท่ากับ  $1/q_m K_L$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/q_m$

### 3) การวิเคราะห์สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชไอโซเทอม

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$C_e$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่หลังสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$K_F$	=	ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อมิลลิกรัม) <sup>1/n</sup>
	$n$	=	ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชสามารถจัดภาพให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$$

เมื่อนำข้อมูลจากสมการข้างต้นมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_F$

### 4) การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม

นอกจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ใช้ในการพิจารณาความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมแล้ว ความสอดคล้องของสมการไอโซเทอมยังสามารถพิจารณาได้จากค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) ให้มีค่าน้อยที่สุด การคำนวณค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{(q_{e,e} - q_{e,m})^2}{q_{e,m}} \right\}$$

เมื่อ	$q_{e,e}$	=	ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตตที่สภาวะสมดุล ที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$q_{e,m}$	=	ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตตที่สภาวะสมดุล ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนเตตของดินเหนียวเคโอลิไนต์แสดงดังตารางที่ ก.1 และผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนเตตของดินทรายซิลิกาแสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 ไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนตของดินเหนียวเคโอลิไนท์

ลำดับ	น้ำหนักดิน	ปริมาณอาร์เซนต				$q_e$ =	ไอโซเทอม					
		เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย	ถูกดูดซับ	$X/M$		แลงเมียร์			ฟรุนดิช		
		มก./ล.	มก./ล. ( $C_e$ )	มก. ( $X$ )			$1/q_e$	$1/C_e$	$q_{e,m}$	$\log q_e$	$\log C_e$	$q_{e,m}$
1	0.0994	0	0.00	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
2	0.1011	0	0.00	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
3	0.1011	0	0.00	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
4	0.1010	5	4.12	0.013	0.130	7.67	0.24	0.127	-0.88	0.62	0.136	
5	0.0997	5	4.06	0.014	0.141	7.11	0.25	0.126	-0.85	0.61	0.135	
6	0.0998	5	4.16	0.013	0.126	7.95	0.24	0.128	-0.90	0.62	0.136	
7	0.1007	10	8.75	0.019	0.187	5.35	0.11	0.210	-0.73	0.94	0.189	
8	0.0993	10	8.64	0.020	0.206	4.85	0.12	0.208	-0.69	0.94	0.188	
9	0.1003	10	8.73	0.019	0.190	5.27	0.11	0.210	-0.72	0.94	0.189	
10	0.1012	20	18.08	0.029	0.284	3.52	0.06	0.298	-0.55	1.26	0.260	
11	0.1007	20	18.38	0.024	0.241	4.16	0.05	0.300	-0.62	1.26	0.262	
12	0.1010	20	18.29	0.026	0.253	3.95	0.05	0.300	-0.60	1.26	0.262	
13	0.1013	40	37.53	0.037	0.365	2.74	0.03	0.375	-0.44	1.57	0.359	
14	0.1013	40	37.58	0.036	0.358	2.80	0.03	0.375	-0.45	1.58	0.359	
15	0.1008	40	37.52	0.037	0.368	2.71	0.03	0.375	-0.43	1.57	0.359	
16	0.0995	80	76.45	0.053	0.535	1.87	0.01	0.427	-0.27	1.88	0.492	
17	0.0999	80	76.58	0.051	0.514	1.95	0.01	0.427	-0.29	1.88	0.492	
18	0.0999	80	76.62	0.051	0.507	1.97	0.01	0.427	-0.30	1.88	0.492	
19	0.0996	100	96.68	0.050	0.501	2.00	0.01	0.440	-0.30	1.99	0.545	
20	0.1009	100	96.52	0.052	0.517	1.93	0.01	0.440	-0.29	1.98	0.545	
21	0.0997	100	96.53	0.052	0.523	1.91	0.01	0.440	-0.28	1.98	0.545	
Chi-Square ( $\chi^2$ )								0.124			0.019	

ตารางที่ ก.2 ไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนตของดินทรายซิลิกา

ลำดับ	น้ำหนักดิน	ปริมาณอาร์เซนต				$q_e$ =	ไอโซเทอม					
		เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย	ถูกดูดซับ	$q_e$ X/M		แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
							มก./ล.	มก./ล. ( $C_e$ )	มก. (X)	$1/q_e$	$1/C_e$	$q_{e,m}$
1	0.1003	0	0.00	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
2	0.0997	0	0.00	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
3	0.0991	0	0.00	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
4	0.1005	5	4.60	0.006	0.060	16.78	0.22	0.065	-1.22	0.66	0.072	
5	0.0993	5	4.51	0.007	0.075	13.38	0.22	0.064	-1.13	0.65	0.072	
6	0.0993	5	4.60	0.006	0.060	16.61	0.22	0.065	-1.22	0.66	0.072	
7	0.1012	10	9.34	0.010	0.098	10.18	0.11	0.097	-1.01	0.97	0.091	
8	0.1013	10	9.30	0.011	0.104	9.63	0.11	0.097	-0.98	0.97	0.091	
9	0.0995	10	9.32	0.010	0.102	9.80	0.11	0.097	-0.99	0.97	0.091	
10	0.1014	20	19.21	0.012	0.117	8.52	0.05	0.130	-0.93	1.28	0.115	
11	0.1002	20	19.15	0.013	0.128	7.83	0.05	0.130	-0.89	1.28	0.114	
12	0.1001	20	19.17	0.012	0.125	8.01	0.05	0.130	-0.90	1.28	0.114	
13	0.1014	40	38.97	0.015	0.152	6.58	0.03	0.155	-0.82	1.59	0.144	
14	0.1002	40	39.05	0.014	0.142	7.02	0.03	0.156	-0.85	1.59	0.144	
15	0.1000	40	39.03	0.015	0.145	6.88	0.03	0.156	-0.84	1.59	0.144	
16	0.1010	80	78.75	0.019	0.185	5.40	0.01	0.172	-0.73	1.90	0.181	
17	0.1000	80	78.84	0.017	0.174	5.75	0.01	0.172	-0.76	1.90	0.181	
18	0.1009	80	78.73	0.019	0.189	5.30	0.01	0.172	-0.72	1.90	0.181	
19	0.1005	100	98.75	0.019	0.187	5.36	0.01	0.175	-0.73	1.99	0.194	
20	0.1001	100	98.73	0.019	0.190	5.26	0.01	0.175	-0.72	1.99	0.194	
21	0.0995	100	98.84	0.017	0.175	5.73	0.01	0.175	-0.76	1.99	0.194	
Chi-Square ( $\chi^2$ )								0.0114			0.0145	



ภาคผนวก ข

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ข-1 การคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนเตบนดินตัวอย่าง

#### 1) การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ )

$$q_t = X/M$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$X$	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$M$	=	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตที่เวลาใดๆ ของดินเหนียวเคโอลิไนท์ ที่เวลาการดูดซับ 30 นาที

$$q_t = 0.014 / 0.0996$$

$$= 0.136 \quad \text{มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

#### 2) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$k_1$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อชั่วโมง)
	$t$	=	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่ออินทิเกรตสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนจาก  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้สมการเส้นตรงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนแสดงได้ดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ( $k_1$ ) และสามารถหาค่าสมการเส้นตรงนี้คำนวณความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ได้จากจุดตัดแกนตั้งของสมการเส้นตรง

### 3) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือน

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$k_2$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)
	$t$	=	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่ออินทิเกรตสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนจาก  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้สมการเส้นตรงของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ  $1/q_e$  ซึ่งสามารถนำค่า  $1/q_e$  มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับอาร์เซนที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ได้ และสามารถใช้สมการเส้นตรงนี้คำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ( $k_2$ ) ได้จากจุดตัดแกนตั้งของสมการเส้นตรง

### 4) การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับสมการจลนพลศาสตร์

ความสอดคล้องของสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอาร์เซนบนดินตัวอย่าง พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ใกล้เคียงหนึ่งและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งคำนวณได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดลองกับการคำนวณจากสมการ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$SD = \sqrt{\frac{\sum \left[ \frac{q_{t,exp} - q_{t,cal}}{q_{t,exp}} \right]^2}{n-1}}$$

เมื่อ	$q_{t,exp}$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
-------	-------------	---	--

$$q_{t,cal} = \text{ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)}$$

$$n = \text{จำนวนจุดข้อมูล}$$

ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนิตของดินเหนียวเคโอลิไนต์แสดงดังตารางที่ ข.1 และผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนิตของดินทรายซิลิกาแสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนิตของดินเหนียวเคโอลิไนต์

ลำดับ	น้ำหนักรีดิน (M)	เวลาดูดซับ (ชม.)	ปริมาณอาร์เซนิต			$q_t = X/M$	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา				
			เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย (C <sub>e</sub> )	ถูกดูดซับ (X)		q <sub>e</sub>	อันดับหนึ่งเสมือน		อันดับสองเสมือน	
								log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )	q <sub>t,cal</sub>	t/q <sub>t</sub>	q <sub>t,cal</sub>
1	0.0996	0.5	100	99.10	0.014	0.136	0.555	-0.38	0.029	3.69	0.078
2	0.0994	0.5	100	99.28	0.011	0.109	0.555	-0.35	0.029	4.60	0.078
3	0.1009	0.5	100	99.68	0.005	0.048	0.555	-0.29	0.029	10.51	0.078
4	0.1006	1.0	100	98.85	0.017	0.171	0.555	-0.42	0.056	5.83	0.139
5	0.1010	1.0	100	98.98	0.015	0.151	0.555	-0.39	0.056	6.60	0.139
6	0.1006	1.0	100	99.03	0.015	0.145	0.555	-0.39	0.056	6.91	0.139
7	0.0998	6.0	100	97.79	0.033	0.333	0.555	-0.65	0.232	18.02	0.397
8	0.1001	6.0	100	97.85	0.032	0.322	0.555	-0.63	0.232	18.65	0.397
9	0.1001	6.0	100	97.68	0.035	0.348	0.555	-0.68	0.232	17.26	0.397
10	0.0996	12.0	100	96.55	0.052	0.520	0.555	-1.45	0.322	23.10	0.487
11	0.1000	12.0	100	96.35	0.055	0.548	0.555	-2.12	0.322	21.92	0.487
12	0.0998	12.0	100	96.38	0.054	0.545	0.555	-1.99	0.322	22.02	0.487
13	0.0995	18.0	100	96.39	0.054	0.544	0.555	-1.97	0.356	33.07	0.526
14	0.0995	18.0	100	96.43	0.054	0.539	0.555	-1.79	0.356	33.40	0.526
15	0.1008	18.0	100	96.44	0.053	0.531	0.555	-1.61	0.356	33.93	0.526
16	0.0994	24.0	100	96.51	0.052	0.526	0.555	-1.54	0.370	45.60	0.549
17	0.0994	24.0	100	96.32	0.055	0.555	0.555	-	0.370	43.24	0.549
18	0.1001	24.0	100	96.49	0.053	0.527	0.555	-1.55	0.370	45.58	0.549
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)									0.480	0.244	



ตารางที่ ข.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์เซนิตของดินทรายซิลิกา

ลำดับ	น้ำหนักดิน	เวลาดูดซับ	ปริมาณอาร์เซนิต			$q_t$ =	$q_e$	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา			
			เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย	ถูกดูดซับ			อันดับหนึ่งเสมือน		อันดับสองเสมือน	
								$\log(q_e - q_t)$	$q_{t,cal}$	$t/q_t$	$q_{t,cal}$
กรัม	ชม.	มก./ล.	มก./ล.( $C_e$ )	มก.(X)	X/M						
1	0.0995	0.5	99.45	100	0.008	0.083	0.189	-0.97	0.002	6.03	0.013
2	0.1005	0.5	99.40	100	0.009	0.090	0.189	-1.00	0.002	5.56	0.001
3	0.0995	0.5	99.49	100	0.008	0.078	0.189	-0.95	0.002	6.44	0.036
4	0.1090	1.0	98.97	100	0.015	0.142	0.189	-1.33	0.004	7.04	0.019
5	0.1007	1.0	99.08	100	0.014	0.137	0.189	-1.28	0.004	7.31	0.011
6	0.0997	1.0	99.02	100	0.015	0.147	0.189	-1.37	0.004	6.81	0.028
7	0.1009	6.0	98.87	100	0.017	0.168	0.189	-1.67	0.020	35.78	0.000
8	0.1005	6.0	98.82	100	0.018	0.176	0.189	-1.88	0.020	34.10	0.002
9	0.0996	6.0	98.88	100	0.017	0.168	0.189	-1.68	0.020	35.67	0.000
10	0.1007	12.0	98.87	100	0.017	0.168	0.189	-1.68	0.033	71.36	0.001
11	0.0999	12.0	98.84	100	0.017	0.175	0.189	-1.84	0.033	68.60	0.000
12	0.1008	12.0	98.85	100	0.017	0.172	0.189	-1.76	0.033	69.82	0.000
13	0.0993	18.0	98.79	100	0.018	0.182	0.189	-2.15	0.041	98.81	0.001
14	0.1000	18.0	98.89	100	0.017	0.166	0.189	-1.63	0.041	108.40	0.004
15	0.1004	18.0	98.84	100	0.017	0.174	0.189	-1.82	0.041	103.42	0.000
16	0.0993	24.0	98.87	100	0.017	0.171	0.189	-1.74	0.046	140.35	0.001
17	0.0994	24.0	98.75	100	0.019	0.189	0.189	-	0.046	126.83	0.004
18	0.1010	24.0	98.79	100	0.018	0.180	0.189	-2.02	0.046	133.55	0.000
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)									0.8873		0.0848

เนื่องจากผลการทดลอง พบว่า ความเร็วในการดูดซับอาร์เซนเตของดินตัวอย่างทั้งสองชนิด สอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน จึงสามารถคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับและค่าครึ่งเวลาของการดูดซับได้ดังนี้

#### 5) การคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ

$$h = k_2 q_e^2$$

เมื่อ	$h$	=	อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม-ชั่วโมง)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$k_2$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับอาร์เซนเตของดินเหนียวเคโอลิไนท์ เมื่อ  $k_2 = 0.453$  กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง และ  $q_e = 0.629$  มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} h &= 0.453 \times 0.629^2 \\ &= 0.179 \end{aligned} \quad \text{มิลลิกรัมต่อกรัม-ชั่วโมง}$$

#### 6) การคำนวณค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e}$$

เมื่อ	$t_{1/2}$	=	ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ (ชั่วโมง)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$k_2$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับอาร์เซนเตของดินเหนียวเคโอลิไนท์ เมื่อ  $k_2 = 0.453$  กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง และ  $q_e = 0.629$  มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} t_{1/2} &= 1/(0.453 \times 0.629) \\ &= 3.51 \end{aligned} \quad \text{ชั่วโมง}$$



### ค-1 การคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของดินตัวอย่าง

#### 1) การสอบเทียบขวดวัดปริมาตร

จากการสอบเทียบขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร โดยการนำขวดวัดปริมาตรที่แห้งสนิทไปชั่งน้ำหนักจำนวน 5 ครั้ง พบว่า ขวดวัดปริมาตรมีน้ำหนักเท่ากันทั้ง 5 ครั้ง เท่ากับ 182.0002 กรัม

#### 2) การคำนวณปริมาตรสอบเทียบของขวดวัดปริมาตร

$$V_p = \frac{(M_{pw,c} - M_p)}{\rho_{w,c}}$$

เมื่อ	$V_p$	=	ปริมาตรสอบเทียบ (มิลลิลิตร)
	$M_{pw,c}$	=	น้ำหนักของพิคโนมิเตอร์และน้ำกลั่นที่อุณหภูมิสอบเทียบ (กรัม)
	$M_p$	=	น้ำหนักเฉลี่ยของพิคโนมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ (กรัม)
	$\rho_{w,c}$	=	ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิสอบเทียบ (กรัมต่อมิลลิลิตร)

##### 2.1) การคำนวณปริมาตรสอบเทียบของขวดวัดปริมาตรที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิสอบเทียบเท่ากับ 0.99620 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีน้ำหนักของขวดวัดปริมาตรและน้ำกลั่นเท่ากับ 680.1002 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณปริมาตรสอบเทียบได้ดังนี้

$$V_p = \frac{(680.1002 - 182.0002)}{0.99620}$$

$$= 499.9998 \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

##### 2.2) การคำนวณปริมาตรสอบเทียบของขวดวัดปริมาตรที่อุณหภูมิ 28.5 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิ 28.5 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิสอบเทียบเท่ากับ 0.99600 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีน้ำหนักของขวดวัดปริมาตรและน้ำกลั่นเท่ากับ 680.0009 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณปริมาตรสอบเทียบได้ดังนี้

$$V_p = \frac{(680.0015 - 182.0002)}{0.99600}$$

$$= 500.0007 \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

### 2.3) การคำนวณปริมาตรสอบเทียบของขวดวัดปริมาตรที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิตสอบเทียบเท่ากับ 0.99590 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีน้ำหนักของขวดวัดปริมาตรและน้ำกลับเท่ากับ 679.9503 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณปริมาตรสอบเทียบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_p &= (679.9503 - 182.0002)/0.99590 \\ &= 500.0001 \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

### 3) การคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะ

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{M_s \times K}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))}$$

- เมื่อ  $M_s$  = น้ำหนักของดินที่อบแห้ง (กรัม)  
 $M_{pw,t}$  = น้ำหนักของขวดวัดปริมาตรและน้ำที่อุณหภูมิตสอบ (กรัม)  
 $M_{pws,t}$  = น้ำหนักของขวดวัดปริมาตร น้ำและดินที่อุณหภูมิตสอบ (กรัม)  
 $K$  = ค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ

#### 3.1) การคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวเคโอลิไนท์

ตัวอย่างการคำนวณที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส  $M_s = 50.0001$  กรัม,  $M_{pw,t} = 680.1002$  กรัม,  $M_{pws,t} = 712.1803$  และ  $K = 0.99801$

$$\begin{aligned} G_{20^{\circ}\text{C}} &= \frac{(50.0001 \times 0.99801)}{(680.1002 - (712.1803 - 50.0001))} \\ &= 2.7846 \end{aligned}$$

#### 3.2) การคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายซิลิกา

ตัวอย่างการคำนวณที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส  $M_s = 75.0006$  กรัม,  $M_{pw,t} = 680.4504$  กรัม,  $M_{pws,t} = 727.6503$  และ  $K = 0.99801$

$$\begin{aligned} G_{20^{\circ}\text{C}} &= \frac{(75.0006 \times 0.99801)}{(680.4504 - (727.6503 - 75.0006))} \\ &= 2.76924 \end{aligned}$$

ผลการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของดินตัวอย่างทั้งหมด แสดงดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองค่าความถ่วงจำเพาะของดินตัวอย่าง

ลำดับ	รายการ	การทดลอง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
<b>ดินเหนียวเคโอลิไนท์</b>				
1	อุณหภูมิ (°C)	28	28.5	29
2	น้ำหนักขวดวัดปริมาตร (กรัม)	182.0002	182.0002	182.0002
3	น้ำหนักขวดวัดปริมาตรและน้ำ (กรัม)	680.1002	680.0002	681.1601
4	น้ำหนักขวดวัดปริมาตร น้ำและดิน (กรัม)	712.1803	711.9820	713.0856
5	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	498.1000	498.0001	499.1600
6	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	50.0001	50.0002	50.0003
7	ค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (K)	0.99801	0.99787	0.99773
8	ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 °C	2.7846	2.7690	2.7600
<b>ค่าเฉลี่ยค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวเคโอลิไนท์</b>			<b>2.7712</b>	
<b>ดินทรายซิลิกา</b>				
1	อุณหภูมิ (°C)	28	28.5	29
2	น้ำหนักขวดวัดปริมาตร (กรัม)	182.0002	182.0002	182.0002
3	น้ำหนักขวดวัดปริมาตรและน้ำ (กรัม)	680.4504	680.0002	679.2804
4	น้ำหนักขวดวัดปริมาตร น้ำและดิน (กรัม)	727.6503	726.9526	726.2988
5	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	498.4503	498.0000	497.2802
6	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	75.0006	75.0009	75.0004
7	ค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (K)	0.99801	0.99787	0.99773
8	ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 °C	2.6924	2.6683	2.6742
<b>ค่าเฉลี่ยค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายซิลิกา</b>			<b>2.6783</b>	



### ง-1 คำนวณปริมาณโซเดียมคลอไรด์เพื่อควบคุมความเข้มข้นประจุ

การศึกษาค่าจุดประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของดินตัวอย่าง ต้องควบคุมความเข้มข้นประจุของตัวอย่างที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันให้มีความเข้มข้นประจุเท่าๆ กัน เพื่อไม่ให้ความเข้มข้นประจุที่ต่างกันส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนประจุบนผิวดิน

กำหนดให้สารละลายมีความเข้มข้นเท่ากันเท่ากับ 10 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ต้องเติมคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$I.S. = \frac{1}{2} \sum_0^i C_i Z_i^2$$

$$10 \times 10^{-3} = 0.5 \times \{[Na^+] + [Cl^-]\}$$

$$0.02 = \{[Na^+]_{pH} + [Cl^-]_{pH} + [Na^+]_{NaCl} + [Cl^-]_{NaCl}\}$$

$$0.02 = \{[Na^+]_{pH} + [Cl^-]_{pH} + 2[NaCl]_{NaCl}\}$$

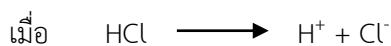
เมื่อ I.S. = ความเข้มข้นประจุ (มิลลิโมลต่อลิตร)  
 $C_i$  = ความเข้มข้นของแต่ละธาตุ (มิลลิโมลต่อลิตร)  
 $Z_i$  = เลขประจุ

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณโซเดียมคลอไรด์สำหรับสารละลายที่มีค่าพีเอช 3.0

1) ความเข้มข้น  $[Cl^-]_{pH}$  ที่ได้จากการเติมกรดไฮโดรคลอริก

$$pH = 3.0$$

$$[H^+] = 10^{-3} \text{ mol/l}$$



$$[Cl^-] = [H^+]$$

$$\text{ดังนั้น } [Cl^-] = 10^{-3} \text{ mol/l}$$

2) ความเข้มข้น  $[NaCl]_{NaCl}$  ที่ต้องเติมในสารละลาย

$$0.02 = \{[Na^+]_{pH} + [Cl^-]_{pH} + 2[NaCl]_{NaCl}\}$$

$$0.02 = 0 + 10^{-3} + 2[NaCl]_{NaCl}$$

$$[NaCl]_{NaCl} = 0.0095 \text{ mol/l}$$



3) ปริมาณ  $[\text{NaCl}]_{\text{NaCl}}$  ที่ต้องเติมในสารละลายปริมาตรสุทธิ 25 มิลลิลิตร จากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} N_1V_1 &= N_2V_2 \\ (1.0) \times V_1 &= 0.0095 \times 25 \\ V_1 &= 0.2375 \quad \text{ml} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ต้องเติมสำหรับสารละลายที่ค่าพีเอชในช่วงที่เป็นกรดดำเนินการตามการคำนวณข้างต้น ส่วนการคำนวณปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ต้องเติมสำหรับสารละลายต่างให้คำนวณความเข้มข้น  $[\text{Na}^+]_{\text{pH}}$  ที่ได้จากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ต้องเติมสำหรับสารละลายค่าพีเอชต่างๆ แสดงดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ควบคุมค่าความเข้มข้นประจุ

พีเอช	$[\text{H}^+]$ (mol/L)	$[\text{OH}^-]$ (mol/L)	ปรับความเข้มข้นประจุจากค่าพีเอช (mol/L)				ปริมาตร NaCl (ml) (NaCl 1.0 mol/L)	ความเข้มข้นประจุรวม (mMol/L)
			$[\text{H}^+]$	$[\text{Cl}^-]$	$[\text{OH}^-]$	$[\text{Na}^+]$		
3.0	1.00E-03		0.001	0.001000			0.2375	10
3.5	3.16E-04		0.0003	0.000316			0.2460	10
4.0	1.00E-04		0.0001	0.000100			0.2488	10
5.0	1.00E-05		0.00001	0.000010			0.2499	10
6.0	1.00E-06		0.000001	0.000001			0.2500	10
8.0		1.00E-06			1.00E-06	0.000001	0.2500	10
10.0		1.00E-04			0.0001	0.0001	0.2488	10
12.0		1.00E-02			0.01	0.01	0.1250	10



### จ-1 การคำนวณปริมาณสารอินทรีย์ของดินตัวอย่าง

#### 1) การคำนวณร้อยละปริมาณของแข็งทั้งหมด

$$\text{Total Solid} = \frac{B - W}{A - W} \times 100$$

เมื่อ	A	=	น้ำหนักดินเริ่มต้นกับน้ำหนักถ้วยเซรามิก (กรัม)
	B	=	น้ำหนักดินหลังอบดินที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส กับน้ำหนักถ้วยเซรามิก (กรัม)
	W	=	น้ำหนักถ้วยเซรามิก (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักของแข็งทั้งหมดของดินเหนียวเคโอลิไนท์ที่มี A = 61.8674 กรัม, B = 61.8651 และ W = 60.8676 กรัม

$$\begin{aligned} \text{Total Solid} &= (61.8651 - 60.8676) \times 100 / (61.8674 - 60.8676) \\ &= 99.77 \quad \text{ร้อยละโดยมวล} \end{aligned}$$

#### 2) การคำนวณร้อยละปริมาณสารอินทรีย์

$$\text{Organic Solid} = \frac{B-C}{A-W} \times 100 = \text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากโมเลกุล}$$

เมื่อ	C	=	น้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440°C กับน้ำหนักถ้วยเซรามิก (กรัม)
-------	---	---	---

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักของแข็งทั้งหมดของดินเหนียวเคโอลิไนท์ที่มี B = 61.8651 กรัม, C = 61.8352, W = 60.8676 กรัม และปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากโมเลกุล = 2.10%

$$\begin{aligned} \text{Organic Solid} &= [(61.8651 - 61.8352) \times 100 / (61.8674 - 60.8676)] - 2.1 \\ &= 0.89 \quad \text{ร้อยละโดยมวล} \end{aligned}$$

ผลการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ของดินตัวอย่างแสดงดังตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองปริมาณสารอินทรีย์ของดินตัวอย่าง

ลำดับ	รายการ	ตัวอย่างที่			X-bar	SD
		1	2	3		
<b>ดินเหนียวเคโอลิไนท์</b>						
1	น้ำหนักดินเริ่มต้น (กรัม)	0.9998	1.0003	1.0003	1.0001	0.0003
2	น้ำหนักถ้วยเซรามิก (กรัม)	60.8676	40.4371	18.1315	39.8121	21.3749
3	น้ำหนักดินรวมถ้วยเซรามิก (กรัม)	61.8674	41.4374	19.1318	40.8122	21.3747
4	น้ำหนักถ้วยเซรามิกและน้ำหนักดินหลังระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 105°C (กรัม)	61.8651	41.4342	19.1269	40.8087	21.3760
5	น้ำหนักถ้วยเซรามิกและน้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440°C (กรัม)	61.8352	41.4088	19.1016	40.7819	21.3737
6	น้ำหนักของแข็งทั้งหมด (กรัม)	0.9975	0.9971	0.9954	0.9967	0.0011
7	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	99.77	99.68	99.51	99.65	0.1320
8	ผลต่างของน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและน้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440 °C (กรัม)	0.0299	0.0254	0.0253	0.0269	0.0026
9	ผลต่างของน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและน้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440 °C (%)	2.991	2.539	2.529	2.6863	0.2639
10	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากโมเลกุล (%)	2.10	2.10	2.10	2.10	0.00
11	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)	0.89	0.44	0.43	0.586	0.263
<b>ดินทรายซิลิกา</b>						
1	น้ำหนักดินเริ่มต้น (กรัม)	1.0008	0.9994	1.0008	1.0003	0.0008
2	น้ำหนักถ้วยเซรามิก (กรัม)	76.5199	73.7781	19.0008	56.4329	32.4462
3	น้ำหนักดินรวมถ้วยเซรามิก (กรัม)	77.5207	74.7775	20.0016	57.4333	32.4458
4	น้ำหนักถ้วยเซรามิกและน้ำหนักดินหลังระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 105°C (กรัม)	77.5207	74.7775	19.9973	57.4318	32.4483
5	น้ำหนักถ้วยเซรามิกและน้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440°C (กรัม)	77.519	74.7768	19.997	57.4309	32.4477
6	น้ำหนักของแข็งทั้งหมด (กรัม)	1.0008	0.9994	0.9965	0.9989	0.0022
7	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	100	100	99.57	99.8567	0.2483
8	ผลต่างของน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและน้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440 °C (กรัม)	0.0017	0.0007	0.0003	0.0009	0.0007
9	ผลต่างของน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและน้ำหนักดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 440 °C (%)	0.17	0.07	0.03	0.0900	0.0721
10	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากโมเลกุล (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)	0.17	0.07	0.03	0.090	0.072



### ฉ-1 การคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง

#### 1) การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ )

$$q_e = X/M$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$X$	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิโมลต่อลิตร)
	$M$	=	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับอาร์เซเนตที่สมดุลของดินเหนียวเคโอลิไนท์

$$q_e = \frac{0.0003}{0.0994} = 0.00302 \quad \text{มิลลิโมลต่อกรัม}$$

#### 2) การวิเคราะห์สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอม

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_m$	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$K_L$	=	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิโมล)
	$C_e$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่หลังสภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อลิตร)

จากสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์สามารถจัดภาพให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$$

เมื่อนำข้อมูลสมการข้างต้นมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/q_e$  และ  $1/C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถใช้คำนวณค่า  $K_L$  และ  $q_m$  จากค่าความชันเท่ากับ  $1/q_m K_L$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/q_m$

### 3) การวิเคราะห์สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชไอโซเทอม

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

เมื่อ	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$C_e$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่หลังสภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อลิตร)
	$K_F$	=	ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม)(ลิตรต่อมิลลิโมล) <sup>1/n</sup>
	$n$	=	ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชสามารถจัดภาพให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$$

เมื่อนำข้อมูลจากสมการข้างต้นมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_F$

### 4) การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับสมการไอโซเทอม

นอกจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ใช้ในการพิจารณาความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมแล้ว ความถูกต้องของสมการไอโซเทอมยังสามารถพิจารณาได้จากค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) ให้มีค่าน้อยที่สุด การคำนวณค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{(q_{e,e} - q_{e,m})^2}{q_{e,m}} \right\}$$

เมื่อ	$q_{e,e}$	=	ความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิทที่สภาวะสมดุล ที่ได้จากการทดลอง (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_{e,m}$	=	ความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิทที่สภาวะสมดุล ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิโมลต่อกรัม)

ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทของดินเหนียวเคโอลิไนท์แสดงดังตารางที่ ฉ.1 และผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิพิทของดินทรายซิลิกาแสดงดังตารางที่ ฉ.2

ตารางที่ ๑.1 ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิทของดินเหนียวเคโอลิไนท์

ลำดับ	น้ำหนักดิน	ปริมาณแรมโนลิท				$q_{e,e} = X/M$	ไอโซเทอม					
		เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย	ถูกดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดิช				
					$1/q_e$		$1/C_e$	$q_{e,m}$	$\log q_e$	$\log C_e$	$q_{e,m}$	
	กรัม (M)	mM/l	mM/l ( $C_e$ )	mM (X)								
1	0.0996	0.00	0.00	0.0000	0.000	-	-	-	-	-	-	
2	0.1006	0.00	0.00	0.0000	0.000	-	-	-	-	-	-	
3	0.0990	0.00	0.00	0.0000	0.000	-	-	-	-	-	-	
4	0.0994	0.05	0.03	0.0003	0.003	329.99	33.42	0.0034	-2.52	-1.52	0.0039	
5	0.0998	0.05	0.03	0.0003	0.003	334.94	33.18	0.0035	-2.52	-1.52	0.0039	
6	0.0995	0.05	0.03	0.0003	0.003	291.06	36.75	0.0031	-2.46	-1.57	0.0036	
7	0.1005	0.10	0.05	0.0008	0.008	131.78	20.34	0.0056	-2.12	-1.31	0.0057	
8	0.1003	0.10	0.05	0.0007	0.007	138.07	19.39	0.0059	-2.14	-1.29	0.0059	
9	0.1001	0.10	0.05	0.0007	0.007	144.14	18.62	0.0061	-2.16	-1.27	0.0061	
10	0.0996	0.50	0.35	0.0022	0.022	44.56	2.85	0.0341	-1.65	-0.45	0.0258	
11	0.1004	0.50	0.34	0.0024	0.024	41.04	2.97	0.0329	-1.61	-0.47	0.0250	
12	0.0996	0.50	0.35	0.0023	0.023	43.01	2.89	0.0336	-1.63	-0.46	0.0255	
13	0.0998	1.00	0.73	0.0041	0.041	24.55	1.37	0.0597	-1.39	-0.14	0.0451	
14	0.1003	1.00	0.71	0.0044	0.044	22.92	1.41	0.0585	-1.36	-0.15	0.0441	
15	0.0998	1.00	0.73	0.0041	0.041	24.33	1.38	0.0596	-1.39	-0.14	0.0450	
16	0.1002	2.50	1.79	0.0107	0.107	9.34	0.56	0.1020	-0.97	0.25	0.0897	
17	0.1002	2.50	1.82	0.0102	0.102	9.78	0.55	0.1029	-0.99	0.26	0.0909	
18	0.1005	2.50	1.85	0.0097	0.097	10.36	0.54	0.1038	-1.02	0.27	0.0923	
19	0.1001	5.00	3.59	0.0212	0.212	4.72	0.28	0.1351	-0.67	0.55	0.1532	
20	0.1001	5.00	3.58	0.0214	0.213	4.69	0.28	0.1350	-0.67	0.55	0.1528	
21	0.0994	5.00	3.60	0.0210	0.211	4.74	0.28	0.1353	-0.68	0.56	0.1536	
22	0.1000	7.50	6.02	0.0223	0.223	4.49	0.17	0.1553	-0.65	0.78	0.2277	
23	0.0995	7.50	5.98	0.0227	0.229	4.38	0.17	0.1552	-0.64	0.78	0.2268	
24	0.0997	7.50	6.03	0.0221	0.222	4.51	0.17	0.1554	-0.65	0.78	0.2280	
25	0.0991	10.00	8.51	0.0223	0.225	4.45	0.12	0.1661	-0.65	0.93	0.2972	
26	0.1006	10.00	8.53	0.0220	0.219	4.57	0.12	0.1661	-0.66	0.93	0.2977	
27	0.0995	10.00	8.50	0.0225	0.226	4.43	0.12	0.1660	-0.65	0.93	0.2969	
Chi-Square ( $\chi^2$ )								0.3097	0.0757			



ตารางที่ ๑.2 ไอโซเทอมการดูดซับแรมโนลิทของดินทรายซิลิกา

ลำดับ	น้ำหนักดิน	ปริมาณแรมโนลิท			$q_{e,e}$ =	ไอโซเทอม					
		เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย	ถูกดูดซับ		แลงเมียร์			ฟรุนดิช		
						$1/q_e$	$1/C_e$	$q_{e,m}$	$\log q_e$	$\log C_e$	$q_{e,m}$
	กรัม (M)	mM/l	mM/l ( $C_e$ )	mM ( $X$ )	X/M						
1	0.1008	0.00	0.00	0.0000	0.000	-	-	-	-	-	-
2	0.0995	0.00	0.00	0.0000	0.000	-	-	-	-	-	-
3	0.1002	0.00	0.00	0.0000	0.000	-	-	-	-	-	-
4	0.1007	0.05	0.04	0.0002	0.001	671.33	25.00	0.0016	-2.83	-1.40	0.0020
5	0.1003	0.05	0.04	0.0002	0.002	655.73	25.13	0.0016	-2.82	-1.40	0.0020
6	0.1003	0.05	0.04	0.0002	0.002	607.81	25.64	0.0015	-2.78	-1.41	0.0019
7	0.1000	0.10	0.08	0.0003	0.003	342.89	12.41	0.0031	-2.54	-1.09	0.0034
8	0.0996	0.10	0.08	0.0003	0.003	302.73	12.81	0.0030	-2.48	-1.11	0.0033
9	0.1005	0.10	0.08	0.0003	0.003	322.58	12.62	0.0031	-2.51	-1.10	0.0034
10	0.1001	0.50	0.41	0.0014	0.014	72.07	2.45	0.0149	-1.86	-0.39	0.0123
11	0.1003	0.50	0.40	0.0015	0.015	66.38	2.50	0.0146	-1.82	-0.40	0.0121
12	0.1008	0.50	0.41	0.0014	0.014	72.62	2.45	0.0149	-1.86	-0.39	0.0123
13	0.0997	1.00	0.83	0.0025	0.025	40.24	1.20	0.0281	-1.60	-0.08	0.0215
14	0.1007	1.00	0.81	0.0028	0.028	35.38	1.23	0.0274	-1.55	-0.09	0.0210
15	0.1010	1.00	0.82	0.0027	0.027	37.48	1.22	0.0277	-1.57	-0.09	0.0212
16	0.1008	2.50	2.10	0.0061	0.060	16.62	0.48	0.0575	-1.22	0.32	0.0443
17	0.1002	2.50	2.02	0.0073	0.073	13.79	0.50	0.0560	-1.14	0.30	0.0430
18	0.1001	2.50	2.08	0.0063	0.063	15.95	0.48	0.0572	-1.20	0.32	0.0441
19	0.1005	5.00	4.40	0.0091	0.090	11.09	0.23	0.0902	-1.05	0.64	0.0793
20	0.0998	5.00	4.39	0.0092	0.092	10.90	0.23	0.0901	-1.04	0.64	0.0792
21	0.1008	5.00	4.36	0.0096	0.096	10.46	0.23	0.0898	-1.02	0.64	0.0788
22	0.0999	7.50	6.90	0.0090	0.090	11.11	0.14	0.1111	-1.05	0.84	0.1130
23	0.1005	7.50	6.86	0.0096	0.095	10.48	0.15	0.1108	-1.02	0.84	0.1125
24	0.1004	7.50	6.84	0.0099	0.099	10.15	0.15	0.1107	-1.01	0.84	0.1122
25	0.1002	10.00	9.40	0.0090	0.090	11.11	0.11	0.1246	-1.05	0.97	0.1440
26	0.1002	10.00	9.37	0.0095	0.095	10.58	0.11	0.1244	-1.02	0.97	0.1436
27	0.1007	10.00	9.37	0.0094	0.094	10.68	0.11	0.1244	-1.03	0.97	0.1437
Chi-Square ( $\chi^2$ )								0.0066	0.0468		



### ช-1 การคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทบนดินตัวอย่าง

#### 1) การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ )

$$q_t = X/M$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$X$	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิโมลต่อลิตร)
	$M$	=	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแรมโนลิพิทที่เวลาใดๆ ของดินเหนียวเคโอลิไนท์ ที่เวลาการดูดซับ 30 นาที

$$\begin{aligned} q_t &= 1.36 \times 10^{-4} / 0.1001 \\ &= 0.0014 \quad \text{มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

#### 2) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือน

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$k_1$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อชั่วโมง)
	$t$	=	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่ออินทิเกรตสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนจาก  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้สมการเส้นตรงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเสมือนแสดงได้ดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ( $k_1$ ) และสามารถหาค่าสมการเส้นตรงนี้คำนวณความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเนตที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ได้จากจุดตัดแกนตั้งของสมการเส้นตรง

### 3) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

เมื่อ	$q_t$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_e$	=	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$k_2$	=	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิโมล-ชั่วโมง)
	$t$	=	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่ออินทิเกรตสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือนจาก  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้สมการเส้นตรงของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ  $1/q_e$  ซึ่งสามารถนำค่า  $1/q_e$  มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับแรมโนลิทที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ได้ และสามารถใช้สมการเส้นตรงนี้คำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ( $k_2$ ) ได้จากจุดตัดแกนตั้งของสมการเส้นตรง

### 4) การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับสมการจลนพลศาสตร์

ความสอดคล้องของสมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแรมโนลิทบนดินตัวอย่าง พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ใกล้เคียงหนึ่งและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งคำนวณได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดลองกับการคำนวณจากสมการ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$SD = \sqrt{\frac{\sum \left[ \frac{q_{t,exp} - q_{t,cal}}{q_{t,exp}} \right]^2}{n-1}}$$

เมื่อ	$q_{t,exp}$	=	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลอง (มิลลิโมลต่อกรัม)
-------	-------------	---	---

$$q_{t,cal} = \text{ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิโมลต่อกรัม)}$$

$$n = \text{จำนวนจุดข้อมูล}$$

ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทของดินเหนียวเคโอลิไนท์แสดงดังตารางที่ ข.1 และผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทของดินทรายซิลิกาแสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิพิทของดินเหนียวเคโอลิไนท์

ลำดับ	น้ำหนักดิน	เวลาดูดซับ	ปริมาณแรมโนลิพิท			$q_t$	$q_e$	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา				
			เริ่มต้น	คงเหลือในสารละลาย	ถูกดูดซับ			$X/M$	อันดับหนึ่งเสมือน		อันดับสองเสมือน	
									$\log(q_e - q_t)$	$q_{t,cal}$	$t/q_t$	$q_{t,cal}$
	กรัม (M)	ชั่วโมง	mM/L	mM/L ( $C_0$ )	mM ( $X$ )							
1	0.1001	0.5	0.05	0.041	$1.36 \times 10^{-4}$	0.0014	$2.96 \times 10^{-3}$	-2.80	$2.06 \times 10^{-4}$	369	$1.05 \times 10^{-3}$	
2	0.1001	0.5	0.05	0.040	$1.45 \times 10^{-4}$	0.0014	$2.96 \times 10^{-3}$	-2.82	$2.06 \times 10^{-4}$	346	$1.05 \times 10^{-3}$	
3	0.1000	0.5	0.05	0.040	$1.45 \times 10^{-4}$	0.0014	$2.96 \times 10^{-3}$	-2.82	$2.06 \times 10^{-4}$	345	$1.05 \times 10^{-3}$	
4	0.1000	1	0.05	0.039	$1.71 \times 10^{-4}$	0.0017	$2.96 \times 10^{-3}$	-2.91	$3.88 \times 10^{-4}$	583	$1.56 \times 10^{-3}$	
5	0.1000	1	0.05	0.039	$1.70 \times 10^{-4}$	0.0017	$2.96 \times 10^{-3}$	-2.90	$3.88 \times 10^{-4}$	588	$1.56 \times 10^{-3}$	
6	0.1001	1	0.05	0.039	$1.72 \times 10^{-4}$	0.0017	$2.96 \times 10^{-3}$	-2.91	$3.88 \times 10^{-4}$	583	$1.56 \times 10^{-3}$	
7	0.1000	6	0.05	0.034	$2.42 \times 10^{-4}$	0.0024	$2.96 \times 10^{-3}$	-3.27	$1.42 \times 10^{-3}$	2,478	$2.63 \times 10^{-3}$	
8	0.0999	6	0.05	0.034	$2.44 \times 10^{-4}$	0.0024	$2.96 \times 10^{-3}$	-3.29	$1.42 \times 10^{-3}$	2,461	$2.63 \times 10^{-3}$	
9	0.1002	6	0.05	0.034	$2.43 \times 10^{-4}$	0.0024	$2.96 \times 10^{-3}$	-3.28	$1.42 \times 10^{-3}$	2,473	$2.63 \times 10^{-3}$	
10	0.1000	12	0.05	0.031	$2.79 \times 10^{-4}$	0.0028	$2.96 \times 10^{-3}$	-3.77	$1.78 \times 10^{-3}$	4,308	$2.83 \times 10^{-3}$	
11	0.1003	12	0.05	0.032	$2.69 \times 10^{-4}$	0.0027	$2.96 \times 10^{-3}$	-3.56	$1.78 \times 10^{-3}$	4,478	$2.83 \times 10^{-3}$	
12	0.1000	12	0.05	0.031	$2.84 \times 10^{-4}$	0.0028	$2.96 \times 10^{-3}$	-3.93	$1.78 \times 10^{-3}$	4,228	$2.83 \times 10^{-3}$	
13	0.1003	18	0.05	0.030	$2.94 \times 10^{-4}$	0.0029	$2.96 \times 10^{-3}$	-4.55	$1.88 \times 10^{-3}$	6,149	$2.90 \times 10^{-3}$	
14	0.1000	18	0.05	0.031	$2.90 \times 10^{-4}$	0.0029	$2.96 \times 10^{-3}$	-4.27	$1.88 \times 10^{-3}$	6,203	$2.90 \times 10^{-3}$	
15	0.1000	18	0.05	0.031	$2.90 \times 10^{-4}$	0.0029	$2.96 \times 10^{-3}$	-4.27	$1.88 \times 10^{-3}$	6,203	$2.90 \times 10^{-3}$	
16	0.0997	24	0.05	0.030	$2.94 \times 10^{-4}$	0.0029	$2.96 \times 10^{-3}$	-5.18	$1.90 \times 10^{-3}$	8,140	$2.93 \times 10^{-3}$	
17	0.1001	24	0.05	0.030	$2.95 \times 10^{-4}$	0.0030	$2.96 \times 10^{-3}$	-5.49	$1.90 \times 10^{-3}$	8,131	$2.93 \times 10^{-3}$	
18	0.0999	24	0.05	0.030	$2.95 \times 10^{-4}$	0.0030	$2.96 \times 10^{-3}$	-	$1.90 \times 10^{-3}$	8,122	$2.93 \times 10^{-3}$	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน									0.5758		0.1578	

ตารางที่ ข.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับแรมโนลิทิดของดินทรายซิลิกา

ลำดับ	น้ำหนักดิน	เวลาดูดซับ	ปริมาณแรมโนลิทิด			$q_t$ = $X/M$	$q_e$	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา					
			เริ่มต้น	คงเหลือ				อันดับหนึ่งเสมือน	อันดับสองเสมือน				
				ในสารละลาย	ถูกดูดซับ					$\log(q_e - q_t)$	$q_{t,cal}$	$t/q_t$	$q_{t,cal}$
				มม/ล	มม								
กรัม	ชั่วโมง	mM/L	mM/L ( $C_e$ )	mM ( $X$ )									
1	0.1000	0.5	0.05	0.049	$9.75 \times 10^{-5}$	$9.75 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.20	$3.98 \times 10^{-5}$	513	$7.16 \times 10^{-4}$		
2	0.0999	0.5	0.05	0.048	$9.30 \times 10^{-5}$	$9.31 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.17	$3.98 \times 10^{-5}$	537	$7.16 \times 10^{-4}$		
3	0.1003	0.5	0.05	0.049	$9.90 \times 10^{-5}$	$9.87 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.20	$3.98 \times 10^{-5}$	507	$7.16 \times 10^{-4}$		
4	0.1003	1	0.05	0.043	$1.06 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.25	$7.91 \times 10^{-5}$	949	$9.93 \times 10^{-4}$		
5	0.1000	1	0.05	0.043	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.31	$7.91 \times 10^{-5}$	892	$9.93 \times 10^{-4}$		
6	0.1001	1	0.05	0.042	$1.19 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.37	$7.91 \times 10^{-5}$	844	$9.93 \times 10^{-4}$		
7	0.0998	6	0.05	0.041	$1.38 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.63	$3.49 \times 10^{-4}$	4,348	$1.47 \times 10^{-3}$		
8	0.1002	6	0.05	0.041	$1.38 \times 10^{-4}$	$1.37 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.62	$3.49 \times 10^{-4}$	4,365	$1.47 \times 10^{-3}$		
9	0.1000	6	0.05	0.041	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.39 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.65	$3.49 \times 10^{-4}$	4,323	$1.47 \times 10^{-3}$		
10	0.0999	12	0.05	0.040	$1.51 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-4.00	$4.97 \times 10^{-4}$	7,936	$1.54 \times 10^{-3}$		
11	0.1000	12	0.05	0.040	$1.48 \times 10^{-4}$	$1.48 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-3.88	$4.97 \times 10^{-4}$	8,096	$1.54 \times 10^{-3}$		
12	0.1006	12	0.05	0.040	$1.54 \times 10^{-4}$	$1.53 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-4.08	$4.97 \times 10^{-4}$	7,842	$1.54 \times 10^{-3}$		
13	0.1003	18	0.05	0.040	$1.57 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-4.31	$5.59 \times 10^{-4}$	11,507	$1.57 \times 10^{-3}$		
14	0.1003	18	0.05	0.040	$1.54 \times 10^{-4}$	$1.53 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-4.10	$5.59 \times 10^{-4}$	11,731	$1.57 \times 10^{-3}$		
15	0.1000	18	0.05	0.039	$1.58 \times 10^{-4}$	$1.58 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-4.53	$5.59 \times 10^{-4}$	11,366	$1.57 \times 10^{-3}$		
16	0.0996	24	0.05	0.039	$1.60 \times 10^{-4}$	$1.60 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-5.08	$5.85 \times 10^{-4}$	14,955	$1.58 \times 10^{-3}$		
17	0.1000	24	0.05	0.040	$1.57 \times 10^{-4}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-4.38	$5.85 \times 10^{-4}$	15,267	$1.58 \times 10^{-3}$		
18	0.0999	24	0.05	0.039	$1.61 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	-	$5.85 \times 10^{-4}$	14,877	$1.58 \times 10^{-3}$		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน								0.7975	0.1226				

เนื่องจากผลการทดลอง พบว่า ความเร็วในการดูดซับแรมโนลิทิดของดินตัวอย่างทั้งสองชนิด สอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่สองเหมือน จึงสามารถคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับและค่าครึ่งเวลาของการดูดซับได้ดังนี้

### 5) การคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ

$$h = k_2 q_e^2$$

เมื่อ  $h$  = อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม-ชั่วโมง)

$q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)

$k_2$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิโมล-ชั่วโมง)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับแรมโนลิทิดของดินเหนียวเคโอลิไนท์ เมื่อ  $k_2 = 343.30$  กรัมต่อมิลลิโมล-ชั่วโมง และ  $q_e = 3.05 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} h &= 343.30 \times (3.05 \times 10^{-3})^2 \\ &= 3.19 \times 10^{-3} \quad \text{มิลลิโมลต่อกรัม-ชั่วโมง} \end{aligned}$$

### 6) การคำนวณค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e}$$

เมื่อ  $t_{1/2}$  = ค่าครึ่งเวลาของการดูดซับ (ชั่วโมง)

$q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$k_2$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับแรมโนลิทิดของดินเหนียวเคโอลิไนท์ เมื่อ  $k_2 = 343.30$  กรัมต่อมิลลิโมล-ชั่วโมง และ  $q_e = 3.05 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} t_{1/2} &= 1/(343.30 \times 3.05 \times 10^{-3}) \\ &= 0.955 \quad \text{ชั่วโมง} \\ &= 58 \quad \text{นาที} \end{aligned}$$





### ซ-1 การประเมินราคาสารเคมีในการบำบัด

การประเมินราคาสารเคมีในการบำบัดนี้พิจารณาเฉพาะต้นทุนสารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์ ที่นำมาเตรียมสารล้างดินความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อลิตร โดยไม่คำนึงถึงต้นทุนอื่นๆ เช่น ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า เป็นต้น จากผลการประเมินพบว่ากรณีที่ใช้สารลดแรงตึงผิวแรมโนลิพิด จะมีต้นทุนสารเคมีในการบำบัด 76,160 บาท ต่อดิน 1 ตัน กรณีที่ใช้เพอร์ริกคลอไรด์มีต้นทุนสารเคมีในการบำบัด 4,622 บาท ต่อดิน 1 ตัน และกรณีที่ใช้แรมโนลิพิดผสมเพอร์ริกคลอไรด์มีต้นทุนสารเคมีในการบำบัด 80,782 บาท ต่อดิน 1 ตัน

#### ตารางที่ ซ.1 การประเมินราคาสารเคมีในการบำบัด

ลำดับ	รายการ	แรมโนลิพิด	เพอร์ริกคลอไรด์
1	ราคาสารเคมี/กรัม	93.25 บาท/กรัม	22.8 บาท/กรัม
2	ปริมาณที่ต้องใช้สำหรับดิน 1 ตัน	816.68 กรัม	202.75 กรัม
3	ราคาสารเคมีต่อดิน 1 ตัน	76,160 บาท	4,622 บาท

หมายเหตุ ราคาแรมโนลิพิดและเพอร์ริกคลอไรด์อ้างอิงจาก [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com) เมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน 2560

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิศรา ตันติวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 8 กันยายน 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 สาขาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 เมื่อจบการศึกษาทำงานเป็นวิศวกรสิ่งแวดล้อมที่บริษัท โพรเกรส เทคโนโลยี คอนซัลแทนส์ จำกัด ตั้งแต่ปี 2556 ถึงปี 2559 รับผิดชอบงานออกแบบระบบสาธารณสุขโรค เช่น ระบบท่อส่งน้ำดิบ ระบบท่อในอาคาร ระบบรวบรวมน้ำเสีย ระบบผลิตน้ำประปา และระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เมื่อปี พ.ศ. 2558 ผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา และทุนอุดหนุนการศึกษาแลกเปลี่ยนและการทำวิจัย ณ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น จากองค์การสนับสนุนนักศึกษาแห่งประเทศไทย หรือ Japan student services organization (JASSO) เพื่อเข้าร่วมโครงการ Urban Environment and Health in Asia (UEHAS) ระหว่างวันที่ 21 กันยายน 2559 ถึง 31 มกราคม 2560

การเผยแพร่ผลงานวิจัยวิทยานิพนธ์

Tantiwong, W. Khaodhiar, S. 2017. Treatment of arsenate contaminated soil using rhamnolipids bio-surfactant with ferric chloride. The proceeding of the 43rd congress on science and technology of Thailand (STT43). 591 -596

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**