

การพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนขี้เถ้าสำหรับโรงงานผลิตน้ำตาล

นางสาวฤษภร รักซ้อน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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.

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF FLUORIDE ADSORBENT FROM PRIMARY SLUDGE
FOR DRINKING WATER PLANT

Miss Warissapon Ruksorn



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนขั้นต้นสำหรับ โรงงานผลิตน้ำดื่ม
โดย	นางสาววฤษภร รักซ้อน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒน์กุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒน์กุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จีรัตน์ กิ่งแก้ว)

วฤชกร รักซ้อน : การพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนขั้นต้นสำหรับโรงงานผลิตน้ำดื่ม (DEVELOPMENT OF FLUORIDE ADSORBENT FROM PRIMARY SLUDGE FOR DRINKING WATER PLANT) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.ชุตินิพนธ์ สิริพิพัฒนกุล , 91 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตตัวดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนของการบำบัดน้ำดื่มเบื้องต้น ดินไดอะทอไมท์ และดินเหนียวเป็นตัวประสาน ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อการดูดซับฟลูออไรด์ เช่น ทดสอบสภาวะการเผาที่อุณหภูมิสูง และอัตราส่วนมวลของดิน สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และสัดส่วนโดยน้ำหนักของดินตะกอนต่อดินไดอะทอไมท์ เป็น 1:1 เส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของเม็ดดูดซับมีค่าเท่ากับ 3-3.5 มิลลิเมตร 42.12 ตารางเมตรต่อกรัม และ 90.86 อังสตรอม ตามลำดับ ผลของปัจจัยทางด้านกายภาพและเคมีได้ถูกศึกษาการทดลองแบบกะ ลักษณะจลนพลศาสตร์สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม และเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอม ปริมาณสูงสุดของการดูดซับ (Q^0) และค่าคงที่แลงเมียร์ (b) มีค่าเท่ากับ 2.805 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.072 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ค่าความร้อนของการดูดซับ (ΔH) มีค่าเท่ากับ -14.77 กิโลจูลต่อโมล อิทธิพลของไอออนลบลดการดูดซับฟลูออไรด์ในลำดับ ดังนี้ $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^-$ การคายฟลูออไรด์ในคอลัมน์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1×10^{-3} โมลาร์ ให้ค่าผลได้การคืนกลับเท่ากับ 98%



ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570562721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FLUORIDE / ADSORPTION / DIATOMITE

WARISSAPON RUKSORN: DEVELOPMENT OF FLUORIDE ADSORBENT FROM PRIMARY SLUDGE FOR DRINKING WATER PLANT. ADVISOR: CHUTIMON SATIRAPIPATHKUL, D.Eng., 91 pp.

In this research work, the production of fluoride adsorbent from sludge of drinking water primary treatment, diatomite and clay as a binder was investigated. Main factors affecting the fluoride adsorption such as pyrolysis condition and mass ratio of soil were tested. The optimal condition was obtained at 550 °C, 30 min, and mass ratio of sludge to diatomite of 1:1. Diameter, surface area and pore size of granular adsorbent were obtained as 3-3.5 mm, 42.12 m²/g, 90.86 Å, respectively. The effect of physic-chemical factors was investigated in batch experiment. The kinetic characteristics of adsorption followed a pseudo-second order and obeyed the Langmuir Isotherm. Maximum adsorption capacity (Q⁰) and Langmuir constants (b) were 2.805 mg/g and 0.072 L/g, respectively. The heat of adsorption (ΔH) was -14.77 kJ/mol. The influence of anions reduced fluoride adsorption in the order of NO₃⁻ > SO₄²⁻ > CO₃²⁻ > Cl⁻. Fluoride desorption in column by using 1x10⁻³ M NaOH solution provided the recovery yield of 98%.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และสนับสนุนที่ดีจาก อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ แนวคิดตลอดจนช่วยชี้แนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล และ ดร.จิรัณ กิ่งแก้ว กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้ความกรุณาสละเวลาเป็นคณะกรรมการในการสอบ และให้ข้อคิดเห็น เสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณเงินสนับสนุนวิทยานิพนธ์จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ตลอดจนเจ้าของโรงงานน้ำดื่ม คุณสุรเดช คุณจรรยาศรี เลิศชัยพิทักษ์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการเข้าไปศึกษาดูงาน และให้ความรู้เกี่ยวกับการผลิตน้ำดื่ม

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี และขอขอบคุณเพื่อน ๆ รวมทั้งรุ่นพี่ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจตั้งแต่เริ่มดำเนินการวิจัยจนเสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฌ
สารบัญตาราง.....	๗
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 การดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ฟลูออไรด์ (Fluoride).....	4
2.1.1 วิธีกำจัดฟลูออไรด์	6
2.2 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption).....	7
2.2.1 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ	8
2.2.2 ลักษณะของการดูดซับ.....	9
2.3 ชนิดของกระบวนการดูดซับ	10
2.3.1 กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ (Batch Adsorption Process).....	10
2.3.2 กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง (Continuous Adsorption Process).....	11
2.4 เวลาการใช้งานของสารดูดซับ	14

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วการดูดซับ.....	15
2.5.1 การถูกรบกวนของน้ำ.....	15
2.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ	15
2.5.3 ขนาดของตัวถูกดูดซับ.....	15
2.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับ	15
2.5.5 อุณหภูมิของระบบ.....	15
2.5.6 พีเอชของสารละลาย.....	16
2.5.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ.....	16
2.6 โครงสร้างรูพรุน.....	16
2.7 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium).....	17
2.8 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Model).....	21
2.8.1 แบบจำลองเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order)	21
2.8.2 แบบจำลองเทียมอันดับสอง (pseudo-second order).....	21
2.9 ลักษณะของดิน	22
2.9.1 องค์ประกอบของดิน	22
2.9.2 แร่วิทยาของดิน	23
2.9.3 กลไกการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนในดิน	24
2.10 ไดอะทอมไมท์ (Diatomite).....	27
2.11 มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค	29
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 ดินที่ใช้ในการวิจัย	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	33

3.3 สารเคมี.....	35
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.4.1 การเตรียมดินสำหรับการทำเม็ดดูดซับ.....	35
3.4.2 การขึ้นรูปเม็ดดูดซับ.....	36
3.4.3 การเตรียมสารละลายฟลูออไรด์.....	36
3.4.4 การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์โดยวิธี SPADNS	36
3.4.5 สร้างกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์	37
3.4.6 วัดปริมาณฟลูออไรด์ของสารละลายตัวอย่าง	37
3.4.7 วิเคราะห์ดินตะกอนและดินไคอะทอไมท์	37
3.4.8 หาอุณหภูมิและสัดส่วนที่เหมาะสมในการทำเม็ดดูดซับฟลูออไรด์	38
3.4.9 หาเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์ (Equilibrium Time).....	39
3.4.10 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ (Adsorption Isotherm).....	39
3.4.11 ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายฟลูออไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ	39
3.4.12 ศึกษาผลของไอออนลบที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ	40
3.4.13 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ	41
3.4.14 วิเคราะห์เม็ดดูดซับ.....	41
3.4.15 การวัดการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ.....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย.....	43
4.1 การเตรียมดินสำหรับการทำเม็ดดูดซับ	43
4.1.1 การเตรียมดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่ม.....	43
4.1.2 การเตรียมดินไคอะทอไมท์.....	44
4.1.3 การเตรียมดินเหนียว.....	44

4.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุในดินตะกอน และดินไต่ตะทอไม้ท์โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)	45
4.3 วิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบในดินตะกอนและดินไต่ตะทอไม้ท์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD).....	46
4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA).....	50
4.5 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคดินตะกอนและดินไต่ตะทอไม้ท์โดย Scanning Electron Microscopy (SEM)	52
4.6 การขึ้นรูปเม็ดดูดซับ	55
4.7 อุณหภูมิและสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดดูดซับ.....	55
4.8 สมบัติทางกายภาพของเม็ดดูดซับด้วยเครื่อง Surface Area-Analyzer	57
4.9 ผลการหาเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ	58
4.10 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic Modeling)	60
4.11 ไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์	62
4.12 ผลของพีเอชของสารละลายฟลูออไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูด ซับ.....	67
4.13 ศึกษาอิทธิพลของไอออนลบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ของเม็ดดูดซับ.....	68
4.14 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ	70
4.15 การฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ (Regenerate).....	72
4.16 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคของเม็ดดูดซับโดย Scanning Electron Microscopy (SEM)	74
4.17 คุณภาพน้ำหลังผ่านเม็ดดูดซับ.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย	77

5.2 ข้อเสนอแนะ	78
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์.....	80
ภาคผนวก ข ข้อมูลความเข้มข้นฟลูออไรด์ก่อนและหลังจากการทำาทดลองซ้ำ 3 ครั้ง	81
รายการอ้างอิง	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	91



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	พื้นตกกระ	5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของร่างกายผิดปกติเนื่องจากการได้รับปริมาณฟลูออไรด์มากเกินไป	5
รูปที่ 2.3	แสดงขบวนการดูดซับของสารดูดซับ	8
รูปที่ 2.4	ระบบการดูดซับแบบกะชั้นตอนเดียว	10
รูปที่ 2.5	ระบบการดูดซับแบบกะไหลสวนทาง	11
รูปที่ 2.6	ระบบดูดซับแบบต่อเนื่อง	12
รูปที่ 2.7	การเคลื่อนที่ของ Adsorption Zone ใน Column ชนิด fixed bed	13
รูปที่ 2.8	ลักษณะของ breakthrough curve ใน Column ชนิด fixed bed	13
รูปที่ 2.9	ลักษณะของแลงเมียร์ไอโซเทอม	18
รูปที่ 2.10	ลักษณะของฟรุนดิชไอโซเทอม	20
รูปที่ 2.11	รูปแบบโครงสร้างทางโมเลกุลของอนุโมลที่จับตัวเป็นแร่ดิน	23
รูปที่ 2.12	แสดง single layer ของ kaolinite	25
รูปที่ 2.13	แสดง single layer ของ montmorillonite	25
รูปที่ 2.14	แสดง single layer ของ illite	26
รูปที่ 2.15	ถ่ายภาพไดอะทอมไทต์ด้วยเครื่อง Transmission Electron Micrographs กำลังขยาย 1800× และ 4000×	27
รูปที่ 3.1	ร่างทำยาลูกกลอน	36
รูปที่ 3.2	แสดงการติดตั้งคอลัมน์ที่ใช้ในการวัดการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ	42
รูปที่ 4.1	ดินตะกอนจากโรงงานน้ำดื่มหลังจากอบแห้ง	43
รูปที่ 4.2	ดินตะกอนที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช	43
รูปที่ 4.3	ดินไดอะทอมไทต์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช	44
รูปที่ 4.4	ดินเหนียวที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช	44
รูปที่ 4.5	แสดงผลการวิเคราะห์สารประกอบในดินตะกอน	46

รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์สารประกอบในดินไดอะทอมไมท์.....	47
รูปที่ 4.7 ผล XRD ของดินตะกอนก่อนเผาและดินตะกอนหลังเผา 550 องศาเซลเซียส.....	49
รูปที่ 4.8 ผล XRD ของดินไดอะทอมไมท์ก่อนเผาและดินไดอะทอมไมท์หลังเผา 550 องศาเซลเซียส...	49
รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ STA ของดินตะกอน.....	51
รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ STA ของดินไดอะทอมไมท์.....	51
รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนโรงงานก่อนเผา.....	53
รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนหลังเผา 550 องศาเซลเซียส.....	53
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของดินไดอะทอมไมด์ก่อนเผา.....	54
รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของดินไดอะทอมไมด์หลังเผา 550 องศาเซลเซียส.....	54
รูปที่ 4.15 เม็ดดูดซับฟลูออไรด์.....	55
รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณการดูดซับของเม็ดดูดซับสัดส่วนต่าง ๆ.....	56
รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ที่เวลาต่าง ๆ.....	59
รูปที่ 4.18 แบบจำลองเทียบอันดับหนึ่ง.....	60
รูปที่ 4.19 แบบจำลองเทียบอันดับสอง.....	61
รูปที่ 4.20 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดูดซับ.....	63
รูปที่ 4.21 ฟรอนดิชไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดูดซับ.....	64
รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณการดูดซับของเม็ดดูดซับที่พีเอช ต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.23 ผลของไอออนลบต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์.....	68
รูปที่ 4.24 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	71
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ Arrhenius plot.....	71
รูปที่ 4.26 แสดงการดูดซับและการฟื้นฟูของเม็ดดูดซับ 3 ครั้ง.....	73
รูปที่ 4.27 แสดงการดูดซับของเม็ดดูดซับ 3 ครั้ง.....	73
รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM ของเม็ดดูดซับฟลูออไรด์ก่อนดูดซับฟลูออไรด์กำลังขยาย x1,000.....	74
รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของเม็ดดูดซับฟลูออไรด์หลังดูดซับฟลูออไรด์กำลังขยาย x1,000.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการวิจัย	3
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ R_L ที่ได้จากกราฟแลงเมียร์ไอโซเทอม	19
ตารางที่ 2.2 แร่ธาตุที่พบและละลายอยู่ในน้ำบาดาล (Dissolved constituents)	29
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลเพื่อการบริโภค	30
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	33
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	35
ตารางที่ 3.3 ปริมาตรในการผสมให้ได้ความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ	41
ตารางที่ 4.1 ปริมาณแร่ธาตุในดินตะกอนจากการวิเคราะห์ด้วย XRF.....	45
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแร่ธาตุในดินไโดอะทอไมท์จากการวิเคราะห์ด้วย XRF.....	45
ตารางที่ 4.3 แสดงการสลายตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโครงสร้างทางเคมีของสารที่อยู่ในดิน	50
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนของดินตะกอนและดินไโดอะทอไมท์โดยเครื่อง STA.....	52
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของเม็ดดูดซับเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยเครื่อง Surface Area –Analyzer	58
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับ.....	61
ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ก่อนและหลังดูดซับด้วยเม็ดดูดซับจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	62
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับตามสมการแลงเมียร์ และฟรุนดิชไอโซเทอม.....	65
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยสารที่มีต้นทุนต่ำ	66
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี.....	72
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบในเม็ดดูดซับจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF.....	75
ตารางที่ 4.12 ตารางคุณภาพน้ำบาดาลและน้ำบาดาลที่ผ่านการดูดซับจากเม็ดดูดซับ	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตมนุษย์จึงจำเป็นต้องแสวงหาแหล่งน้ำสะอาดไว้อุปโภคบริโภค ซึ่งน้ำที่นำมาบริโภคส่วนใหญ่ผลิตมาจากน้ำบาดาล โดยปริมาณและคุณภาพของน้ำบาดาลแตกต่างกันไปตามสภาพธรณีวิทยา และอุทกวิทยาของแต่ละบริเวณ ปัญหาคุณภาพน้ำบาดาลที่เป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สนิมเหล็ก ความกระด้าง ไนเตรต ฟลูออไรด์ และคลอไรด์ ถ้าหากได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นตัวช่วยป้องกันการผุกร่อนของฟัน และรักษาความแข็งแรงของกระดูก [1] ซึ่งปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2521 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ในทางตรงกันข้ามถ้าหากได้รับฟลูออไรด์ปริมาณมากเกินไปมาตรฐาน และเป็นเวลานานจะทำให้เกิดฟันตกกระ มีผลทำให้กระดูกโค้งงอ เปราะ และหักง่าย [2]

จากข้อมูลการติดตามการเปลี่ยนแปลงของน้ำในแอ่งน้ำบาดาลในช่วงระยะเวลา 8 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547-2554 ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พบว่ามีปริมาณฟลูออไรด์เกินมาตรฐานในหลายพื้นที่ ส่วนใหญ่พบตามรอยแตก รอยแยก รอยเลื่อน และบริเวณแหล่งน้ำพุร้อน โดยแอ่งน้ำบาดาลที่พบปริมาณฟลูออไรด์เกินมาตรฐาน ได้แก่ แอ่งน้ำบาดาลจังหวัดแพร่ มีปริมาณฟลูออไรด์เฉลี่ย 0.5-5.9 มิลลิกรัมต่อลิตร แอ่งน้ำบาดาลจังหวัดลำปาง พบปริมาณฟลูออไรด์มากที่สุด 4.6 มิลลิกรัมต่อลิตร แอ่งน้ำบาดาลจังหวัดเชียงใหม่-ลำพูนมีปริมาณฟลูออไรด์เฉลี่ย 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร และแอ่งน้ำบาดาลตากมีปริมาณฟลูออไรด์เฉลี่ย 0.5-22 มิลลิกรัมต่อลิตร [3] จากรายงานจะเห็นได้ว่ามีปริมาณฟลูออไรด์เกินมาตรฐานในแอ่งน้ำบาดาลหลายแห่งในภาคเหนือ ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำบาดาลมาบริโภค ควรทำการกำจัดฟลูออไรด์ที่เกินมาตรฐาน น้ำดื่มออกก่อน เพื่อเป็นการป้องกันผลเสียต่อกระดูกและฟัน ที่เกิดจากการได้รับปริมาณฟลูออไรด์ที่สูงเกินไป

อนึ่งในกระบวนการขั้นตอนของโรงงานผลิตน้ำดื่ม หจก. โอช้ แอนด์ เพียววอเตอร์ จังหวัดเชียงราย มีการตกตะกอนความขุ่นน้ำบาดาลด้วยสารส้ม ทำให้มีดินตะกอนเหลือทิ้งจำนวนมาก จึงเกิดแนวความคิดนำดินตะกอนมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ ซึ่งจากการศึกษาของ Liu Xiaojing และคณะ พบว่า ดินที่มีส่วนประกอบของเหล็ก อะลูมิเนียม นั้นสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ [4] ในขณะที่ดินตะกอนจากโรงงานน้ำดื่มนั้นมีปริมาณอะลูมิเนียม และเหล็กอยู่สูงเช่นเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่

จะนำดินตะกอนจากโรงงานน้ำดื่มมาเป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์ ผสมกับดินไดอะทอไมท์ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นดินเบาที่มีความเป็นรูพรุนในเนื้อดินค่อนข้างสูง มีปริมาณอลูมิเนียม และเหล็กเป็นองค์ประกอบ [5] มาพัฒนาเป็นตัวดูดซับฟลูออไรด์ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับในระบบแบบกะ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ รวมทั้งอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์จากตัวดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์จากดินตะกอนขั้นต้นของโรงงานผลิตน้ำดื่มผสมกับดินไดอะทอไมท์ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวดูดซับฟลูออไรด์ที่พัฒนาขึ้นมา

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้นในการบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำดิบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของดินตะกอนผสมกับดินไดอะทอไมท์ ในการบำบัดแร่ธาตุฟลูออไรด์ โดยแปรผันค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ ค่าพีเอช ไอออนรบกวน อุณหภูมิ รวมทั้งวัดคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ และการฟื้นฟูตัวดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนขั้นต้นของโรงงานผลิตน้ำดื่มร่วมกับดินไดอะทอไมท์ มาบำบัดน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภคได้

1.4.2 สามารถนำดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่มขั้นต้นที่ถือว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น

1.4.3 ทำให้ทราบประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟลูออไรด์ไอออนด้วยตัวดูดซับฟลูออไรด์ที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำดื่มที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดฟลูออไรด์ให้ได้ค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำดื่มก่อนนำมาบริโภค คือไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ซึ่งกระบวนการบำบัดฟลูออไรด์ด้วยวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่สามารถบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่มได้ดี สามารถเตรียมได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์ด้วยดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่ม และดินไดอะทอมไมท์ เนื่องจากดินทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณของอะลูมิเนียม และเหล็กเป็นองค์ประกอบทำให้ดินมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ [4] จากนั้นจึงนำมาวัดประสิทธิภาพการดูดซับในระบบแบบกะ คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิตขึ้นมาได้

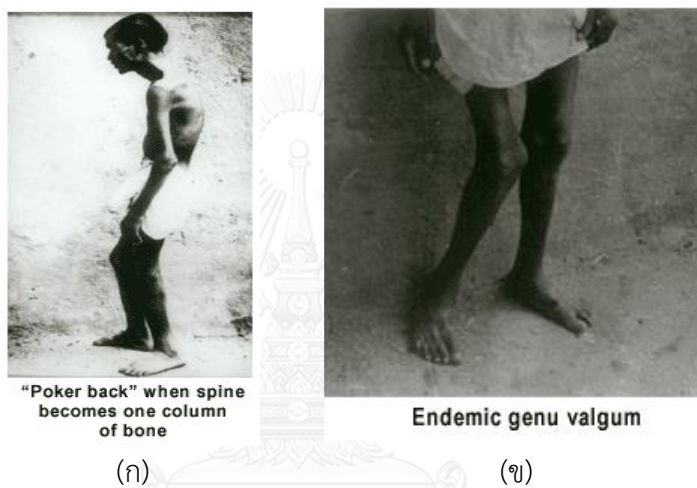
2.1 ฟลูออไรด์ (Fluoride)

ฟลูออรีน (F) เป็นธาตุที่ไม่พบเป็นอิสระในธรรมชาติ มักอยู่ในรูปของแร่ฟลูออไรด์ ซึ่งแร่ฟลูออไรด์ที่สำคัญมีอยู่ 3 ชนิด คือ fluor spar (CaF_2) cryolite (Na_3AlF_6) และ fluorapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) โดยส่วนใหญ่พบฟลูออไรด์ในดิน หรือละลายในแหล่งน้ำใต้ดิน ส่วนในน้ำจะพบฟลูออไรด์ในรูปไอออนอิสระมากกว่ารูปอื่น และ พบว่า น้ำบางแห่งมีปริมาณฟลูออไรด์มากกว่าปกติ เช่น บริเวณที่เป็นรอยแตก รอยแยก รอยเลื่อน และแหล่งน้ำในเขตน้ำพุร้อน โดยฟลูออไรด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางอาหาร น้ำดื่ม และลมหายใจ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเข้าสู่ร่างกายทางการบริโภคน้ำที่มีฟลูออไรด์ปนอยู่ [6]

ฟลูออไรด์ในปริมาณที่พอเหมาะ จะเป็นตัวช่วยป้องกันการผุกร่อนของฟัน และรักษาความแข็งแรงของกระดูก โดยจะไปเพิ่มขนาดของผลึกอะพาไทต์ และลดค่าการละลายของผลึก [7] ซึ่งมีผลทำให้กระดูกแข็งแรง และป้องกันโรคฟันผุได้ ในทางตรงกันข้ามหากได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณมากเกินไป จะทำให้เกิดฟันตกกระ แสดงดังรูปที่ 2.1 ฟันจะมีลักษณะขาวขุ่นบางส่วน หรือเป็นสีน้ำตาล อาจมีหลุมตื้น ๆ เรียงเป็นแถวบนเคลือบฟันแล้วแต่ระดับความรุนแรง และหากได้รับปริมาณฟลูออไรด์มากและเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดความผิดปกติที่กระดูกแขน ขา สะโพก และกระดูกสันหลังจะโก่งงอ หนาตัว เปราะและหักง่าย แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะส่งผลทำให้มีอาการปวดข้อ เคลื่อนไหวลำบาก หรืออาจทำให้เกิดความพิการได้ [8]



รูปที่ 2.1 ฟันตกกระ [9]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของร่างกายผิดปกติเนื่องจากการได้รับปริมาณฟลูออไรด์มากเกินไป [10]

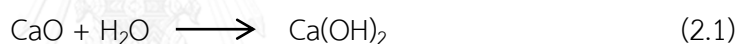
(ก) กระดูกส่วนหลังโค้งงอ (ข) ขาโก่ง

ข้อมูลน้ำบริโภคที่เก็บรวบรวมโดยกองทันตสาธารณสุข จากตัวอย่างน้ำทั่วประเทศ 58,693 ตัวอย่าง พบว่า ร้อยละ 97.6 มีฟลูออไรด์อยู่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนที่เหลือร้อยละ 2.4 มีฟลูออไรด์อยู่ในระดับเท่ากับหรือสูงกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนอาการฟันตกกระพบมากในภาคเหนือ ร้อยละ 23.3 และภาคกลางรองลงมา ร้อยละ 15.5 [1]

2.1.1 วิธีกำจัดฟลูออไรด์

การบำบัดฟลูออไรด์ให้อยู่ในปริมาณที่ไม่เกินมาตรฐาน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และการบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำธรรมชาติ ในส่วนน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟลูออไรด์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตปุ๋ยฟอสเฟต ผลิตกระจก และโรงงานผลิตสารเคมี โดยวิธีการบำบัดจะนิยมใช้การตกตะกอนด้วยสารเคมี เช่น ตกตะกอนด้วยปูนขาว สารส้ม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แต่วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีนี้สามารถลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ได้จนถึงเท่ากับค่าการละลายของตะกอนที่เกิดขึ้นเท่านั้น ซึ่งในกรณีน้ำธรรมชาติมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ค่อนข้างต่ำวิธีที่นิยมใช้บำบัดจะใช้หลักการดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่า โดยสามารถแบ่งวิธีการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำได้ 5 วิธีดังนี้ [7]

2.1.1.1 การตกตะกอน (Precipitation) เป็นการเติมสารเคมีเข้าไปรวมตัวกับฟลูออไรด์ไอออนเพื่อทำให้เกิดเป็นตะกอนออกมา สารเคมีที่ใช้กันทั่วไปคือ สารประกอบแคลเซียมและฟอสเฟต แสดงดังสมการ 2.1 และ 2.2



แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) มีค่าการละลายประมาณ 15 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร คือสามารถละลายในน้ำได้เล็กน้อย

2.1.1.2 การจับเป็นก้อน (Coagulation) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคแขวนลอย (suspended matter) สารที่ใช้เติมให้จับตัวเป็นก้อน ได้แก่ ปูนขาว (lime) และสารส้ม (alum) เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ จะได้ Aluminium hydroxide floc Al(OH)_3 มีลักษณะคล้ายวุ้น จะไปรวมกับอนุภาคอื่นที่มีประจุบวกเกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวก ซึ่งสามารถไปดึงประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ออกได้ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



2.1.1.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างฟลูออไรด์และตัวกลาง โดยฟลูออไรด์ไอออนจะเข้าแทนที่ประจุลบของสารตัวกลาง ทำให้ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำลดลง และมีประจุลบจากสารกรองแทนที่ฟลูออไรด์ในน้ำ การยึดจับของฟลูออไรด์กับสารตัวกลางมีลักษณะเป็นการยึดเกาะทางเคมี วัสดุกลางเหล่านี้ ได้แก่ ถ่านกระดูก วัสดุกระดูกสังเคราะห์ (synthetic ion exchange media) เป็นต้น

2.1.1.4 กระบวนการเมมเบรน (Membrane based processes) เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว กระบวนการเมมเบรนที่ใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ ได้แก่ รีเวิร์ส ออสโมซิส (RO) นาโนฟิลเตรชัน (NF) และ อิเล็กโตรไดอะไลซิส (ED) วิธีการกำจัดนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพง

2.1.1.5 การดูดซับ (Adsorption) หลักการนี้นำมาใช้บำบัดฟลูออไรด์ในน้ำธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำธรรมชาติมีไม่มากนัก และไม่สามารถบำบัดด้วยหลักการตกตะกอนได้ เนื่องจากขีดจำกัดจากค่าการละลายของตะกอนที่เกิดขึ้น

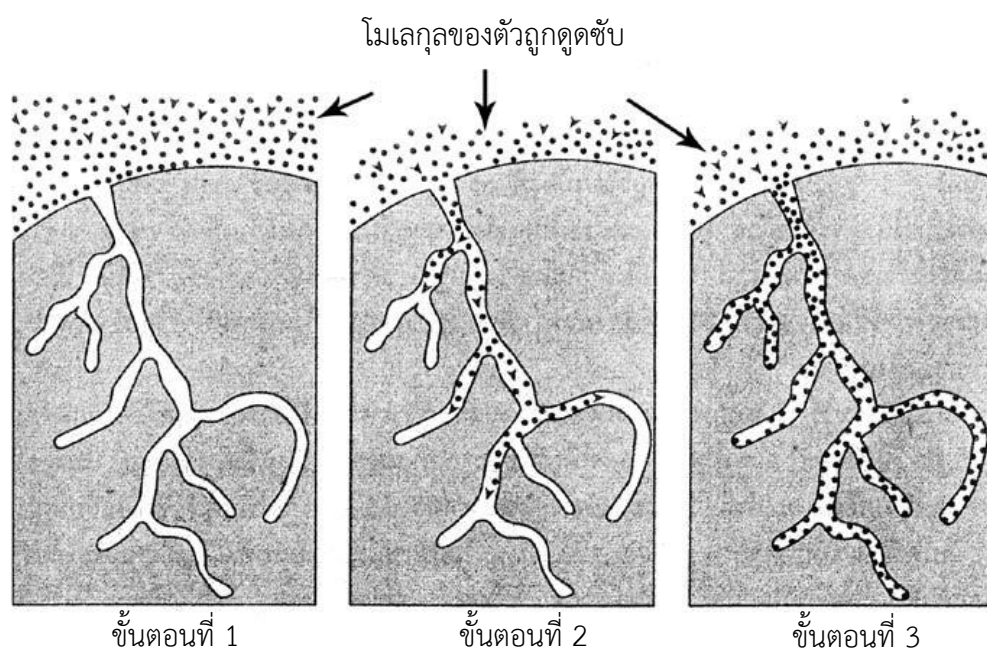
สารดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบที่นิยมใช้มากที่สุด คือ แอคติเวตเต็ดอะลูมินา ส่วนสารดูดซับชนิดอื่นที่นิยมใช้ เช่น แอคติเวตเต็ดคาร์บอน ซิลิกา เป็นต้น แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแอคติเวตเต็ดอะลูมินา นอกจากนี้ยังมีการใช้สารดูดซับในธรรมชาติ เช่น ถ้ำลอย ถ้ำกระดูกปลา เป็นต้น ซึ่งในสารดูดซับประเภทนี้มีองค์ประกอบของซิลิกา อลูมินาเป็นองค์ประกอบ ทำให้สามารถเกิดการดูดซับฟลูออไรด์ได้เช่นกัน

2.2 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการดึงดูดโมเลกุล หรือคอลลอยด์ ให้มาเกาะติดบนผิวของของแข็งหรือของเหลว ถือเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้ง 3 สถานะ คือมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยการดูดซับได้กำหนดนิยามที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้ [10]

Adsorbate	หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ
Adsorbent	หมายถึง ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะจับของ adsorbate
Adsorption	หมายถึง การดูดซับ
Solute	หมายถึง โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว
Sorption	หมายถึง การดูดติด

กลไกการดูดซับของสารถูกดูดซับเกิดขึ้น 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.3 ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายเข้าหาผิวภายนอกของสารดูดซับ ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดติดผิว ขั้นตอนที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ อาจเกาะติดผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อม ๆ กัน [10, 11]



รูปที่ 2.3 แสดงขบวนการดูดซับของสารดูดซับ

2.2.1 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

การดูดซับถือเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักดัน (Driving force) หลัก 2 ชนิด คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย และความชอบหรือความดึงดูด (Affinity) ของตัวถูกดูดซับที่มีต่อตัวดูดซับ ซึ่งแรงที่ตัวถูกละลายจะไปเกาะติดที่ผิวของแข็ง (high affinity of solute to solid) มีแรงอยู่ 3 แบบดังนี้ [10]

2.2.1.1 แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attraction force) มีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุจะแลกเปลี่ยนติดกับโมเลกุลของสารอื่นได้ พวกไดวาเลนต์ (divalent) จะดูดซับที่ผิวของวัตถุอื่นได้ดีกว่าพวกโมนาเลนต์ (monovalent)

2.2.1.2 แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) มีลักษณะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) โดยตัวถูกละลายจะไม่เลือกเกาะติดที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง แต่สามารถเกาะติดได้อย่างอิสระ และเคลื่อนที่ได้ในระหว่างผิวของสารทั้งสอง บางครั้งเรียกได้ว่าเป็นการดูดซับในอุดมคติ (ideal adsorption) การดูดซับแบบนี้เกิดขึ้นได้ดีในที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.2.1.3 ธรรมชาติทางเคมี (Chemical nature) การดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า chemical adsorption หรือ activate adsorption ซึ่งการดูดซับในลักษณะนี้ ตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างผิวของสารทั้งสอง และเป็นได้เฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

2.2.2 ลักษณะของการดูดซับ

2.2.2.1 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาโดยอาศัยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance) และวัดค่าแมกเนติกซัสเซพทิบิลิตี (magnetic susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับทางเคมี โดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60-70 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สามารถถูกดูดซับอยู่บนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ เกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น และการดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดผ่นกลับได้ (irreversible) หรือผ่นกลับได้แต่น้อยมาก ใช้เวลาการดูดซับนาน นั่นคือเมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะไม่มีหลุดออกมา หรือถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยาก และมักมีการเปลี่ยนรูปไป [12]

2.2.2.2 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อน ๆ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 50 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำ และเป็นแบบหลายชั้น (multi molecular layer) ที่ความดันสูง หรือตัวถูกดูดซับอาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (superimpose layers) บนผิวของตัวดูดซับ โดยในแต่ละชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ [13] ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผ่นกลับได้ง่าย (reversible) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี หรือถึงสภาวะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงาน

กระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมากจะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่เจาะจง กล่าวคือ สารต่าง ๆ สามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้ง่าย เช่น ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อย หรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงแต่ประการใด และการดูดซับจะไม่ทำให้ตำแหน่งเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับหมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ และแรงดึงดูดระหว่างขั้วมากกว่าการเกิดพันธะ [12]

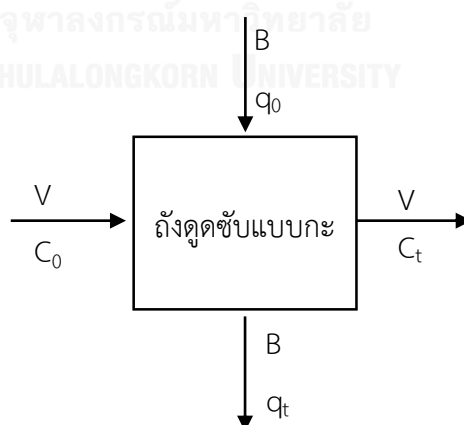
2.3 ชนิดของกระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ระบบดังนี้ [14]

2.3.1 กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ (Batch Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ เป็นการใส่สารดูดซับดูดซับสารถูกดูดซับในน้ำในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาจะยาวนานหรือสั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ขนาดของสารดูดซับ และการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารปนเปื้อน กระบวนการดูดซับแบบระบบแบบกะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

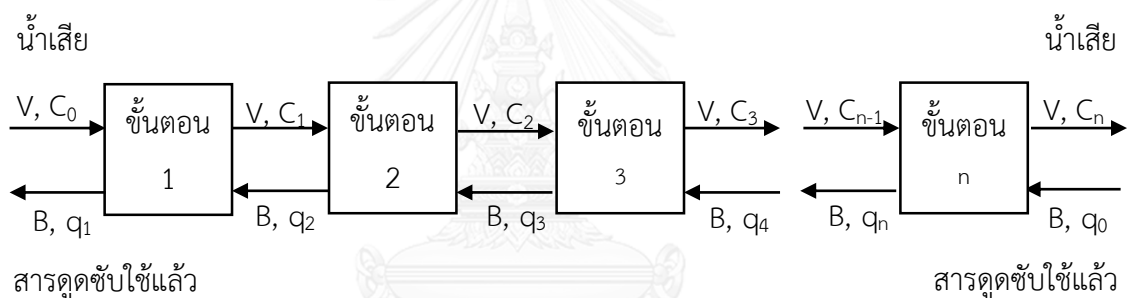
1) กระบวนการดูดซับแบบขั้นตอนเดียว (Single-Stage Operation) เป็นระบบการดูดซับที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบการดูดซับแบบกะขั้นตอนเดียว

เมื่อ	V	คือ ปริมาณน้ำที่นำเข้าออก (L)
	C_0	คือ ความเข้มข้นของสารละลายเข้าระบบ (mg/L)
	C_t	คือ ความเข้มข้นของสารละลายออกจากระบบ (mg/L)
	B	คือ ปริมาณของสารดูดซับ (g)
	q_0	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ เมื่อเข้าระบบ (mg/g)
	q_t	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ เมื่อออกจากระบบ (mg/g)

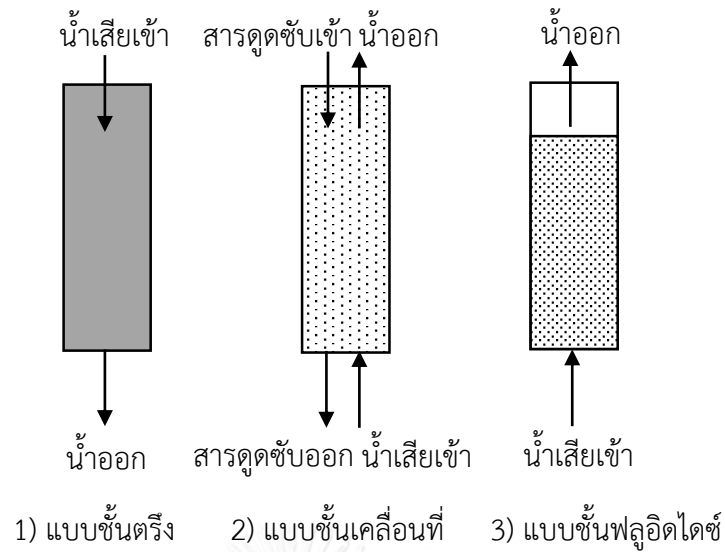
2) กระบวนการดูดซับแบบไหลสวนทาง (Countercurrent Operation) เป็นระบบการดูดซับที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบการดูดซับแบบกะไหลสวนทาง

2.3.2 กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง (Continuous Adsorption Process)

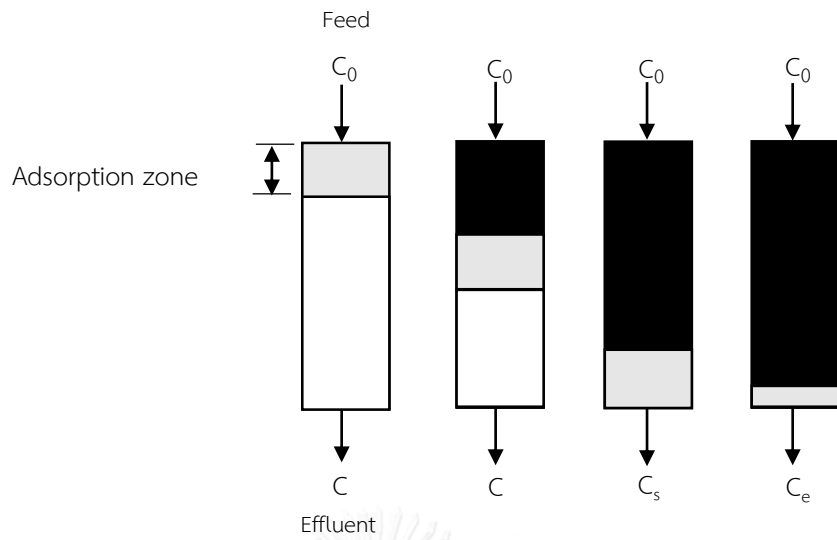
กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่องเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบกะ และใช้กับปริมาณน้ำมาก ๆ ซึ่งกระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่องสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ 1) แบบชั้นตรึง (Fixed Bed) 2) แบบชั้นเคลื่อนที่ (Moving Bed) และ 3) แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized Bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



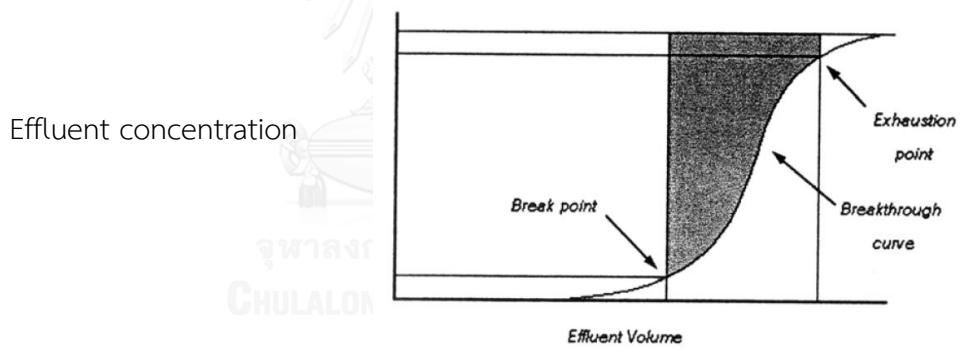
รูปที่ 2.6 ระบบดูดซับแบบต่อเนื่อง

เมื่อนำน้ำที่ต้องการบำบัดมากรองผ่านชั้นของสารดูดซับ สารดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของสารดูดซับจะหมดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้น ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกหรือสารที่ถูกดูดซับในน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนในที่สุดความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุด จุดนี้เรียกว่า break point และเส้นโค้งดังรูปที่ 2.8 เรียกว่า breakthrough curve เวลานั้นนับจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึง break point เรียกว่า break point time ซึ่ง break point time นี้จะมีค่าลดลงเมื่อ [10]

- ความสูงของชั้นสารดูดซับลดลง
- เม็ดของสารดูดซับมีขนาดใหญ่
- อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถังกรองดูดซับเพิ่มขึ้น
- ความเข้มข้นของสารที่ต้องการดูดซับ (adsorbate) เพิ่มขึ้น และ break point time จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ
- ความสูงของชั้นสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น
- อัตราการไหลของน้ำในถังลดลง
- ขนาดของเม็ดดูดซับลดลง ซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของ Adsorption Zone ใน Column ชนิด fixed bed



รูปที่ 2.8 ลักษณะของ breakthrough curve ใน Column ชนิด fixed bed

การทำงานของระบบดูดซับโดยใช้ถักรองดูดซับ จะเป็นไปตามสมการของ Bohart-Adams ดังสมการ 2.5

$$t = \frac{N_0 H}{C_0 V} - \frac{1}{C_0 K} \ln \left(\frac{C_0}{C_b} - 1 \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ	t	คือ เวลาในการใช้งาน (Service time)
	V	คือ ความเร็วในการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นของสารดูดซับ
	H	คือ ความสูงของชั้นสารดูดซับ
	N_0	คือ ความจุในการดูดซับของสารดูดซับ
	K	คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ
	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำ
	C_b	คือ ความเข้มข้นในการใช้งานของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำ

ถ้าให้ $t = 0$ แทนในสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่ 2.6

$$H = \frac{V}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_b} - 1 \right) \quad (2.6)$$

ในกรณีนี้ H เรียกว่า ความสูงวิกฤต (critical bed depth) คือความสูงของชั้นสารดูดซับที่จะทำให้ค่า C_0 ลดเหลือ C_b ในทันที และจากสมการที่ 2.5 สามารถหาค่าได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง t กับ H จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ N_0/C_0V ค่า K หาได้จากค่าจุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\ln \left(\frac{C_0}{C_b} - 1 \right) \frac{1}{C_0N}$$

2.4 เวลาการใช้งานของสารดูดซับ

ระยะเวลาการใช้งานของสารดูดซับจะขึ้นกับปัจจัยดังนี้ [15]

2.4.1 ความลึกของชั้นสารดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของสารดูดซับจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มความลึกของชั้นสารดูดซับ และจะลดลงเมื่อความลึกของชั้นสารดูดซับลดลง

2.4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ โดยสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเวลาใช้งานจะมีแนวโน้มมากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

2.4.3 อัตราการบำบัด จะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของสารดูดซับ คือที่อัตราการบำบัดสูงจะมีเวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ

2.4.4 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับ จะส่งผลต่อเวลาการใช้งาน โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับสูงจะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ

เมื่อสารดูดซับหมดสภาพ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ได้โดยกระบวนการคาย (desorption) กระบวนการคาย เป็นการหลุดออกของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งวิธีการฟื้นฟูสภาพอาจใช้วิธีทางเคมี วิธีความร้อน หรือวิธีเฝ้า [14]

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ และขีดความสามารถในการดูดซับมีดังนี้ [16]

2.5.1 การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับ ในกรณีที่น้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนา ทำให้สารถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบได้ยาก แต่ถ้าหากน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่สะสมตัวเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาสารดูดซับเร็วกว่า

2.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ หมายความว่าสารที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย

2.5.3 ขนาดของตัวถูกดูดซับ

การดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับ เล็กน้อย หรือขนาดที่สามารถเข้าโพรงได้พอดี

2.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับ

โมเลกุลของสารที่ละลายน้ำได้ดีมักเกิดการดูดซับได้ยาก เนื่องจากสารที่ละลายน้ำได้ดี จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำอย่างหนาแน่นทำให้โมเลกุลถูกดึงออกจากน้ำไปติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก

2.5.5 อุณหภูมิของระบบ

ความสามารถในการดูดซับของการดูดซับทางกายภาพจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิ เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

2.5.5.1 กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.5.5.2 อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของสารถูกดูดซับ สำหรับสารถูกดูดซับบางชนิดจะมามีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ

2.5.6 พิเอชของสารละลาย

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวสารดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง และพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเป็นเบสในการดูดซับ [17]

2.5.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

2.6 โครงสร้างรูพรุน

เมื่อพิจารณาลักษณะของรูพรุนตามขนาดของรัศมี สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ [12]

2.6.1 แมโครพอร์ (macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000-2,000 อังสตรอม ปริมาณอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

2.6.2 มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชั่นนัลพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15-2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม

2.6.3 ไมโครพอร์ (micropores) ขนาดรัศมีน้อยกว่า 15-16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด

2.7 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อย ๆ จะมีการคายและดูดซับเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จนในที่สุดปริมาณของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดซับ และปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของสารดูดซับมีจำนวนเท่ากัน ซึ่งจุดนี้อัตราการดูดซับและอัตราการคายจะเท่ากัน หรือระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่ง ๆ จะเป็นสมบัติของระบบนั้น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรดเป็นด่างของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น [12]

2.7.1 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอม

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นที่ผิวกับความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับ คือ สมการแลงเมียร์ และ ฟรันทซ์ไอโซเทอม [10]

2.7.1.1 แลงเมียร์ไอโซเทอม

สมการแลงเมียร์ เสนอแบบจำลองการดูดซับ และการคายจากผิวของแข็งบนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวชั้นเดียว (monolayer) ที่มีความสม่ำเสมอ (homogeneous) มีจำนวนของตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของวัสดุดูดซับแน่นอน การสร้างพันธะของทุกโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต่อบริเวณเกิดพันธะ (binding sites) ของวัสดุดูดซับใช้พลังงานเท่ากัน และเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกันจากสมมติฐานข้างต้น ทำให้เขียนสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ได้ดังสมการที่ 2.7 [18]

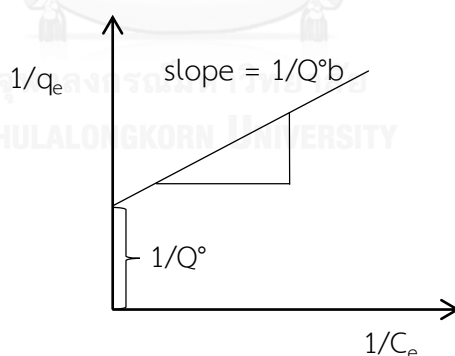
$$\frac{X}{M} = q_e = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.7)$$

เมื่อ	X	คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (mg)
	M	คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)
	C	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (mg/l)
	Q^0	คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียว ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
	b	คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ bonding strength หรือเป็นค่าคงที่ของ ความร้อนของการดูดซับ (ได้จากการทดลอง)

จากสมการที่ 2.7 สามารถเปลี่ยนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการ 2.8

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{Q^0 b} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{Q^0} \quad (2.8)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $1/q_e$ เป็นแกน Y และ $1/C_e$ เป็นแกน X จะได้ค่าความชันเท่ากับ $1/Q^0 b$ และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/Q^0$ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ Q^0 และ b ได้จากจุดตัดแกน Y และค่าความชันของกราฟ



รูปที่ 2.9 ลักษณะของแลงเมียร์ไอโซเทอม [10]

การจัดแจงแบบไอโซเทอมแลงเมียร์สามารถบอกลักษณะของการดูดซับได้ด้วยการพิจารณาจากค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่เรียกว่า ค่าคงที่ของการแยกตัว (Dimensionless Constant Separation Factor, R_L) ตามสมการที่ 2.9 และค่า R_L ที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.1 [5]

$$R_L = \frac{1}{1 + bc_i} \quad (2.9)$$

- เมื่อ b คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับ bonding strength หรือค่าคงที่ของความร้อนของการดูดซับ
- c_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/L)

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ R_L ที่ได้จากกราฟแลงเมียร์ไอโซเทอม

ค่าคงที่ของการแยกตัว (R_L)	การดูดซับ
$R_L > 1$	การดูดซับไม่ดี
$R_L = 1$	การดูดซับคงที่
$0 < R_L < 1$	การดูดซับดี
$R_L = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

2.7.1.2 ฟรอนดิชไอโซเทอม

แบบจำลองของฟรอนดิช เสนอว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวแบบไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous) ไม่เรียงเป็นชั้นเดียว พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะ (binding site) ของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน และเป็นไปอย่างกระจายตัว เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับเกิดปฏิกิริยาต่อกัน และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด สมการแสดงความสัมพันธ์ของฟรอนดิชไอโซเทอม แสดงดังสมการ 2.10 [10, 18]

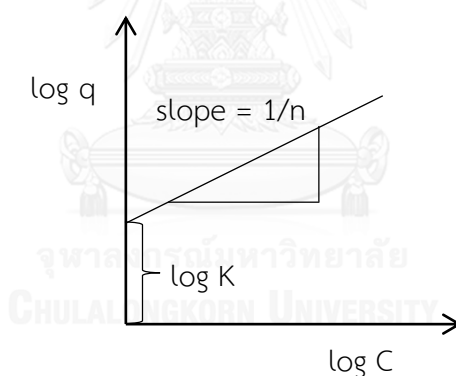
$$q = \frac{X}{M} = KC^{(1/n)} \quad (2.10)$$

- เมื่อ X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (mg)
- M คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)
- K คือ ค่าคงที่ฟรอนดิช (mg/g)
- n คือ Adsorption Intensity (g/L)

สมการที่ 2.10 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการ 2.11

$$\log q = \log K + \left(\frac{1}{n}\right) \log C \quad (2.11)$$

เมื่อนำค่า $\log q$ กับ $\log C$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q$ เป็นแกน Y และ $\log C$ เป็นแกน X จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\log K$ แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อ $1/n = 1$ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง $1/n > 1$ บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และ $1/n < 1$ พื้นผิวบนตัวถูกดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ จะเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ เมื่อความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียของสมการฟรุนดิชข้อหนึ่ง คือไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



รูปที่ 2.10 ลักษณะของฟรุนดิชไอโซเทอม [10]

2.8 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Model)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับทำให้ทราบถึงกลไกการดูดซับ อัตราการดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงภาวะสมดุล โดยเกิดอัตราการระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) แบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ แบบจำลองเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และแบบจำลองเทียมอันดับสอง (pseudo-second order) โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ตั้งบนสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudo-chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง [18, 19]

2.8.1 แบบจำลองเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order)

แบบจำลองเทียมอันดับหนึ่ง อธิบายระบบการดูดซับที่มีอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ว่างบนตัวดูดซับเพียงตัวแปรเดียว เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับคงที่ตลอดการดูดซับ และค่าคงที่อัตรา (k_1) แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ [18, 19] ดังแสดงในสมการ 2.12

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.12)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.12 ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง >0 ($q_t = 0$ ถึง >0) หลังจากนั้นจัดให้ได้สมการเส้นตรงของ แบบจำลองเทียมอันดับหนึ่งดังสมการที่ 2.13

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2.13)$$

2.8.2 แบบจำลองเทียมอันดับสอง (pseudo-second order)

แบบจำลองเทียมอันดับสอง อธิบายระบบการดูดซับที่มีขั้นกำหนดอัตรา (rate limiting step) ในระบบการดูดซับถูกกำหนดการดูดซับทางเคมี (chemisorption) [18, 19] ดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.14)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.14 ที่เวลา $t = 0$ ถึง t และ $q_t = 0$ ถึง q_t ได้ตั้งสมการที่ 2.15

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.15)$$

จัดรูปสมการที่ 2.15 ให้เป็นสมการเส้นตรงตั้งสมการที่ 2.16

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (2.16)$$

โดยที่	q_e	คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ (mg/g)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (min^{-1})
	k_2	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (min^{-1})
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

2.9 ลักษณะของดิน

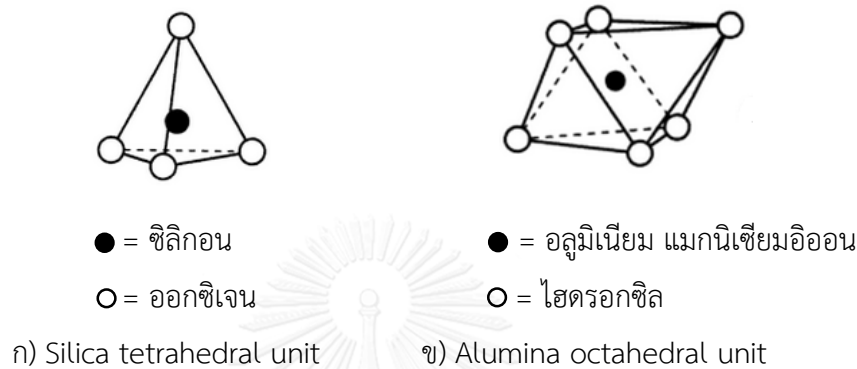
ดิน คือวัตถุธรรมชาติที่เกิดจากการแปรสภาพ หรือสลายตัวของหินแร่ธาตุ และอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ผสมคลุกเคล้ากันจะเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะร่วนไม่เกาะกันแข็งเป็นหิน เกิดขึ้นเป็นชั้นบาง ๆ และเป็นที่ยึดเหนี่ยวในการเจริญเติบโตของพืช [8]

2.9.1 องค์ประกอบของดิน

ดิน (Clay; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) คือสารประกอบไฮดรรัส อลูมินัส ซิลิเกต (Hydrous Aluminous Silicate) ที่มีส่วนประกอบและโครงสร้างของผลึกแน่นอน โดยทฤษฎีแล้วจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 46.5 อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 39.5 และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 14.0 เมื่อนำดินมาผสมกับน้ำจะทำให้เกิดความเหนียวขึ้น และสามารถปั้นให้เป็นรูปต่าง ๆ ได้ ถ้าปล่อยให้แห้งจะยังคงรักษารูปร่างเดิมไว้ มีความแข็งแรงที่ดีขึ้น และค่อนข้างเปราะ ถ้าเผาแล้วจะทำให้แกร่งมากขึ้น และเมื่อผสมกับน้ำจะไม่ทำให้ความเหนียวกลับคืนมาอีก

2.9.2 แร่วิทยาของดิน

แร่ดินชนิดต่าง ๆ เกิดจากการจับตัวของโครงสร้างโมเลกุลหลัก 2 แบบ คือ อะลูมินา-แมกนีเซียม ออกตะฮีดรอล (Alumina-Magnesium Octohedron) และ ซิลิกา เตตระฮีดรอน (Silica tetrahedron) การจัดเรียงตัวเป็นแร่ดินแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปแบบโครงสร้างทางโมเลกุลของอนุภาคที่จับตัวเป็นแร่ดิน

โครงสร้างอะตอมอนุภาค 2 แบบนี้ สามารถจับตัวเป็นโครงสร้างแบบแผ่น (sheet structure) ในกลุ่มฟิลาซิลิเกต (Phyllosilicates) หรือจับตัวกันแบบลูกโซ่ (Chain silicate) ในกลุ่มแร่แอตทapulโกต์ก็ได้ (Attapulgit) โดยโครงสร้างหลักมีรูปแบบการจับตัวตามชนิดของโครงสร้าง คือ

2.9.2.1 โครงสร้างของซิลิเกต (silicate structure) จับตัวกันได้หลายรูปแบบขึ้นกับการเชื่อมโยงกันของ silicon oxygen tetrahedron ทำให้แร่กลุ่มนี้มีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนโดยทั่วไปสามารถแบ่งเป็น 4 ชนิด ได้แก่

1) ออร์โธซิลิเกต (orthosilicate) SiO_4^{4-} มีโครงสร้างเป็นเตตระฮีดรอลเดี่ยว ๆ แร่ที่จับอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ MgSiO_4 xMg_2SiO_4 yFe_2SiO_4 garnet zircon และอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งได้แก่ kyanite silimnite และ andalusie

2) ไพโรซิลิเกต (pyrosilicate) $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ โครงสร้างอนุภาคไพโรซิลิเกตประกอบด้วย รูปเตตระฮีดรอล 2 รูปเชื่อมกันที่มุม กลุ่มแร่ไพโรซิลิเกตเป็นกลุ่มแร่ที่พบยาก

3) เมตาซิลิเกต (metasilicate) $\text{Si}_2\text{O}_3^{2-}$ โครงสร้างจะมี 2 มุมของรูปเตตระฮีดรอลเชื่อมกัน ทำให้เกิดรูปร่างหรือรูปแบบต่างๆ ในรูปอนุภาค $(\text{SiO}_3)_n^{2n}$ อนุภาคชนิดนี้มีโครงสร้างการจับกันของซิลิกาเตตระฮีดรอลสองรูปแบบคือ โครงสร้างเป็นวงและโครงสร้างเป็นเส้น

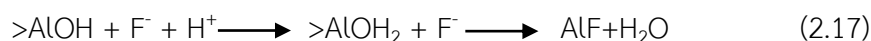
4) เลเยอร์ซิลิเกต $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n^{n-}$ โครงสร้างเป็นชั้นประกอบด้วยเตตระฮีดรอลซึ่งมุม 3 มุมของรูปมีการเชื่อมโยงกัน รวมถึงกลุ่มแร่ไดซิลิเกตเป็นโครงสร้างที่พบในแร่ดิน เกิดจากการเชื่อมโยงกันของออกซิเจนกับออกซิเจนอะตอม 3 คู่ของเตตระฮีดรอล ของแต่ละหน่วยการเชื่อมโยงกันไปอย่างต่อเนื่องในลักษณะที่เป็นแผ่น ซึ่งมีอัตราส่วนของ Si : O เท่ากับ 2 : 5 รูปร่างของ tetrahedral sheet จะมีลักษณะคล้ายรวงผึ้งตรงกลางของแต่ละเซลล์เป็นโพรงใหญ่

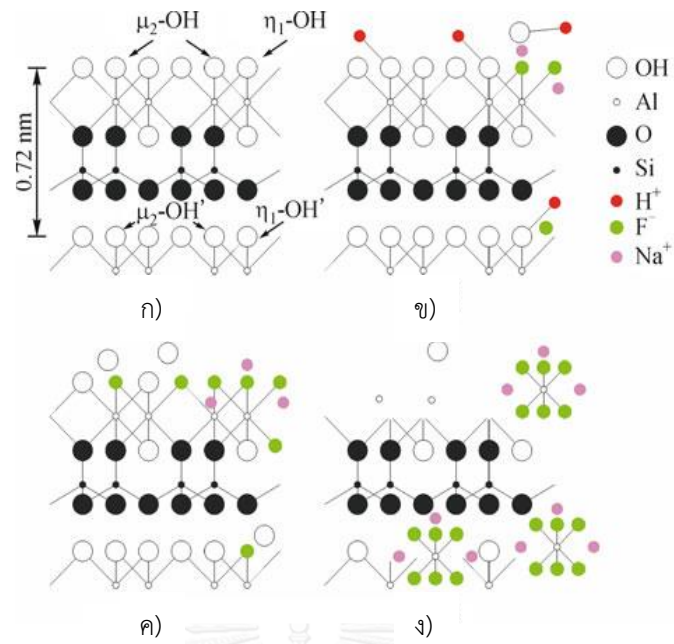
2.9.2.2 โครงสร้าง octahedral sheet ประกอบด้วยคู่ของ octahedral-packed OH sheet ซึ่งมีอนุบลวอยู่ระหว่างชั้นออกเตฮีดรอลที่เรียงซ้อนกันอย่างเหมาะสม พวกมีอนุบลวอาจเป็น Al^{3+} Fe^{2+} หรือ Mg^{2+} โดยดินซึ่งมีคุณสมบัติเด่น ๆ จะประกอบด้วยอนุบลวของ Al^{3+} นอกจากนี้ใน octahedral sheet ยังมีโพรงเช่นเดียวกับ tetrahedral sheet ซึ่งโพรงเหล่านี้ พวกอนุบลวจะเข้าไปอยู่ได้ โดยลักษณะการแทนที่ในโพรง การเรียงลำดับของแผ่นอลูมินาและซิลิกาจะ ทำให้ลักษณะโครงสร้างของดินแตกต่างกันไป แบ่งเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ 3 พวกคือ kaolinite montmorillonite และ illite

2.9.3 กลไกการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนในดิน

กลไกการดูดซับฟลูออไรด์ไอออน (F^-) ใน kaolinite montmorillonite และ illite แสดงดังรูปที่ 2.12 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

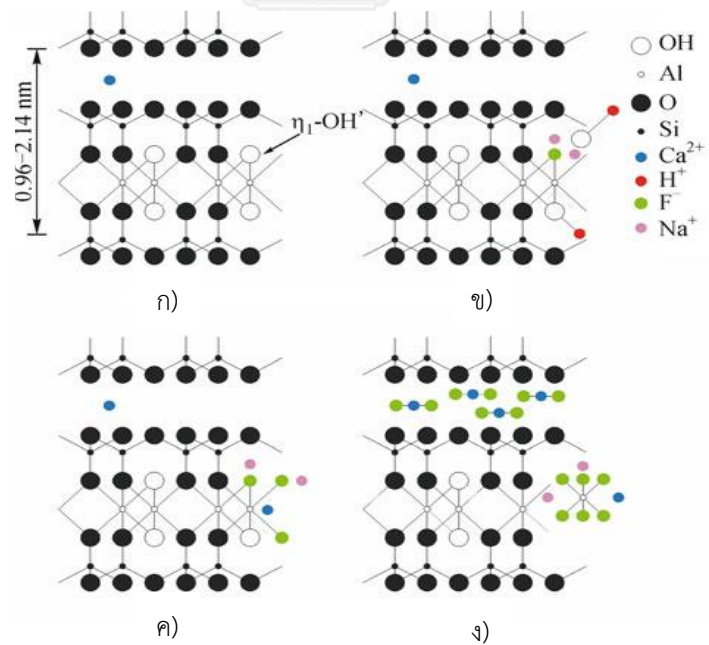
กลไกการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนของ kaolinite เมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่สามารถเข้าแทนที่ OH ได้โดยตรง เนื่องจาก reactive potential ของฟลูออไรด์ไอออนน้อยกว่า OH แต่จะเข้าไปแทนที่ OH_2 ในตำแหน่งของ $\eta_1\text{-OH}$ เมื่อ H^+ ในสารละลายเข้าไปจับกับ $\eta_1\text{-OH}$ แสดงดังสมการ 2.17 เมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร reactive potential ของฟลูออไรด์ไอออนมากกว่า OH decomposition energy ของ $\eta_1\text{-OH}$ site ทำให้ฟลูออไรด์ไอออนสามารถเข้าไปแทนที่ได้โดยตรง ในตำแหน่งของ $\eta_1\text{-OH}$ $\eta_1\text{-OH}'$ และ $\mu_2\text{-OH}$ และเมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงความเข้มข้นนี้ ฟลูออไรด์ไอออนสามารถแทนที่หมู่ไฮดรอกไซด์ และเกิดพันธะกับออกไซด์ได้โดยตรง คือสามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ $\eta_1\text{-OH}$ $\eta_1\text{-OH}'$ $\mu_2\text{-OH}$ และไปเกาะกับ aluminum-oxygen octahedron กลไกดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.12 ข ค และ ง ตามลำดับ





ก) Blank ข) 0.3–5mg F⁻/L ค) 5–100 mg F⁻/L ง) 100–1000 mg F⁻/L

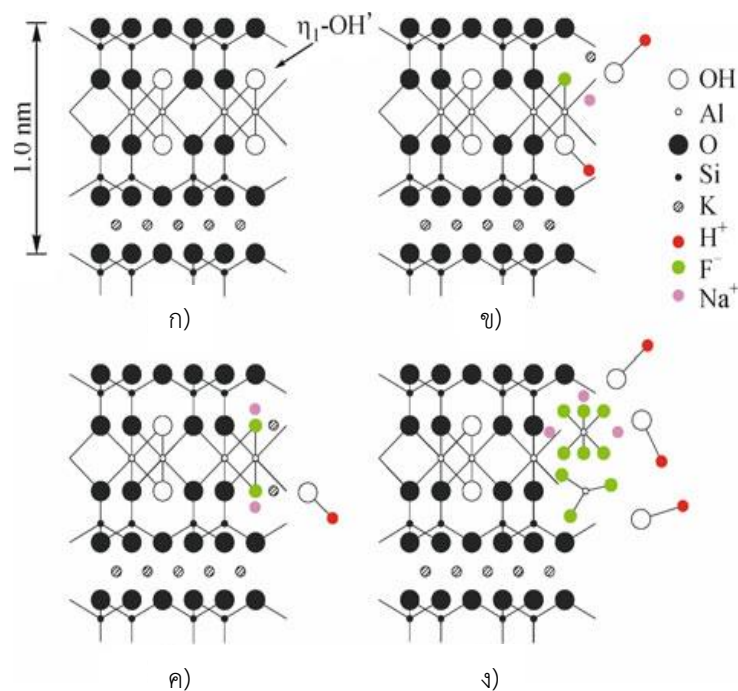
รูปที่ 2.12 แสดง single layer ของ kaolinite



ก) Blank ข) 0.3–50 mg F⁻/L ค) 50–100 mg F⁻/L ง) 100–1000 mg F⁻/L

รูปที่ 2.13 แสดง single layer ของ montmorillonite

กลไกการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนของ montmorillonite เมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์ไอออนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่สามารถเข้าแทนที่ OH ได้โดยตรง แต่จะเข้าไปแทนที่ OH₂ ในตำแหน่งของ η_1 -OH เมื่อ H⁺ ในสารละลายเข้าไปจับกับ η_1 -OH ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟลูออไรด์ไอออนสามารถเข้าไปแทนที่ OH และรวมกับ Al³⁺ ได้โดยตรง นอกจากนี้ ฟลูออไรด์ไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นของ montmorillonite จะจับเป็นตะกอนกับ Ca²⁺ หรือ Mg²⁺ โดยกลไกดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.13 ในภาพ ข ค และ ง ตามลำดับ



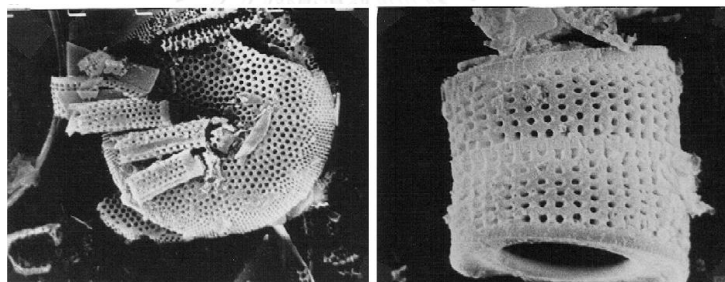
ก) Blank ข) 0.3–1.5 mg F⁻/L ค) 5–100 mg F⁻/L ง) 100–1000 mg F⁻/L

รูปที่ 2.14 แสดง single layer ของ illite

กลไกการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนของ illite เมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์ไอออนมีค่าระหว่าง 0.3-1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจับกับ η_1 -OH ได้โดยตรง ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเข้าไปแทนที่ OH และรวมกับ Al³⁺ ได้โดยตรง และที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงความเข้มข้นนี้ ฟลูออไรด์ไอออนสามารถแทนที่หมู่ไฮดรอกไซด์ และเกิดพันธะกับออกไซด์ได้โดยตรง แตกต่างกับที่ illite ไม่สามารถเข้าไปเกาะระหว่างชั้น แบบ kaolinite และ montmorillonite ได้ กลไกดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.14 [20]

2.10 ไตอะทอไมท์ (Diatomite)

ไตอะทอไมท์ (Diatomite) หรือ ดินเบา เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งมีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ เกิดจากซากพืชเซลล์เดียวที่เรียกว่า ไดอะตอม ซึ่งเมื่อตายลงจะตกจมลงมาทับถมกันเป็นหินชั้น ส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุจะสลายไป คงเหลือแต่เปลือกที่เป็นซิลิกาสะสมจับตัวกันแน่นกลายเป็น ดินไดอะตอม ทำให้ดินมีส่วนประกอบของซิลิกาอสัญฐาน (amorphous silica) มีสูตรโมเลกุลอยู่ในรูป $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ การที่เปลือกไดอะตอมมีรูปร่างแตกต่างกัน การจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ หรือว่าอัดตัวกันอย่างไม่สนิท ทำให้ดินไตอะทอไมท์มีความพรุน (porosity) ในเนื้อดินค่อนข้างสูง รูพรุนสูงถึงร้อยละ 70 หรือมากกว่า มีสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ละลายได้ในด่างแก่ และในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid; HF) แต่ไม่ละลายในกรดอื่น มีคุณสมบัติยอมให้ของไหลผ่านได้ มีน้ำปนอยู่ประมาณ 2-10 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี มีคุณสมบัติยอมให้ของไหลซึมผ่านได้ เมื่อถ่ายภาพไตอะทอไมท์ด้วยเครื่อง Transmission Electron Micrographs กำลังขยาย 1800× และ 4000× แสดงดังรูปที่ 2.15 [5, 21]



รูปที่ 2.15 ถ่ายภาพไตอะทอไมท์ด้วยเครื่อง Transmission Electron Micrographs กำลังขยาย 1800× และ 4000× [22]

ไตอะทอไมท์ผลิตมากที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกา โรมานีเย รัสเซีย ฝรั่งเศส แหล่งไตอะทอไมท์ในประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณจังหวัดลำปาง กระจายตัวอยู่ทางตอนกลางของจังหวัดในพื้นที่ 5 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ อำเภอกะคา บ้านแม่กัว อำเภอสบปราบ และบ้านทุ่งตุ่น ตำบลวอแก้ว อำเภอฉัตร รวมเป็นพื้นที่ประมาณ 4,300 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมีไตอะทอไมท์บริเวณอำเภอแม่ทะมากกว่าบริเวณอื่น ๆ

การใช้ประโยชน์ดินเบาในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [23]

1) ใช้เป็นสารช่วยกรอง (Filter aids) ในการกรองผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในอุตสาหกรรมกรองสารเคมีชนิดอินทรีย์ และอนินทรีย์เภสัชภัณฑ์ (pharmaceuticals) เบียร์ เหล้าองุ่น น้ำมันต่าง ๆ เนื่องจากดินไดอะทอมไมท์มีคุณสมบัติในการซึมซับอนุภาคชนิดละเอียดที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายที่ต้องการกรองได้ดี รวดเร็ว และได้สารละลายที่ใสขึ้น

2) ใช้เป็นตัวเติม (Filters) ในสี พลาสติก ยาง เกล็ดขี้ผึ้ง สารขัดมัน และเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ ใช้เติมในผลิตภัณฑ์ของสี และสีรองพื้น เนื่องจากดินไดอะทอมไมท์มีคุณสมบัติเป็น flattening ที่ดี ทำให้การซึมของสีดีขึ้น แห้งเร็ว มีความตึงผิวดี และเรียบเหมือนขัดด้วยทราย ส่วนดินไดอะทอมไมท์ที่ใช้เติมในอุตสาหกรรมพลาสติก ส่วนใหญ่ใช้เป็นสาร anti-blocking ในผลิตภัณฑ์ฟิล์มโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ ตามปกติจะเติมดินไดอะทอมไมท์ไปให้มีความเข้มข้น 300-500 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการติดกันของฟิล์ม

3) ใช้ทำแผ่นฉนวนและผงดูดซับ (Insulators and absorbents) บริษัทในประเทศเดนมาร์กได้ผลิตอิฐฉนวนจากวัตถุดิบที่เรียกว่า molar ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ เป็นสารผสมระหว่างดินไดอะทอมไมท์ และ 20-25 เปอร์เซ็นต์ ของ plastic clay นอกจากนี้ยังใช้ molar ซึ่งมีส่วนผสมของดินไดอะทอมไมท์ใช้ในการผลิตสารดูดซับชนิดผง และชนิดเม็ดที่ใช้ในเตาอบแห้ง ส่วนดินไดอะทอมไมท์ที่เป็นผง และผ่านการ calcine แล้วจะใช้ในวัตถุระเบิด seed coating แลในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมีต่าง ๆ

4) การใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ดินไดอะทอมไมท์สามารถเป็นสารขัดถูชนิดอ่อนสำหรับผสมในยาสีฟันและยาขัดโลหะ เป็นตัวกลางที่ใช้ป้องกันการแข็งตัวของปุ๋ย ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยเป็นตัวเติมเพื่อลดความเหนียวในดินปั้น และเพิ่มความแข็งแรง นอกจากนี้ยังเป็นตัวช่วยในการขึ้นรูปที่ดี ใช้ทำน้ำยาเคลือบในการทำผงสีเซรามิก และทำอิฐทนไฟ เพราะมีคุณสมบัติด้านทนความร้อนเป็นตัวกลางควบคุมในวัตถุระเบิด ใช้ใน chromatography support media และ pitch control ในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นตัวนำพาตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นตัวนำพาในอุตสาหกรรมทำกรดทำกำมะถัน และในกรดฟอสฟอริก ในการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น

จากคุณสมบัติดินไดอะทอมไมท์มีความเป็นรูพรุนสูง มีส่วนประกอบของซิลิกา อลูมินา และเหล็กเป็นองค์ประกอบ ดินไดอะทอมไมท์น่าจะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ โดยผสมร่วมกับดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่มได้

2.11 มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

โดยทั่วไปน้ำบาดาลก่อนที่จะพัฒนามาเป็นน้ำเพื่อการบริโภคจะพบมีเกลือแร่ละลายอยู่ ปริมาณเกลือแร่ที่พบในน้ำบาดาลจะมีมากกว่าน้ำผิวดินในแม่น้ำลำธาร เพราะน้ำบาดาลมีโอกาที่จะสัมผัสกับแร่ธาตุต่าง ๆ ในหินที่น้ำบาดาลกักเก็บอยู่ และปริมาณเกลือแร่ของน้ำบาดาลจะเพิ่มมากขึ้นตามความลึก ปริมาณเกลือแร่ที่พบในน้ำบาดาลทั่ว ๆ ไปแสดงดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แร่ธาตุที่พบและละลายอยู่ในน้ำบาดาล (Dissolved constituents) [24]

Major Constituents (1 to 1000 mg/L)		Secondary Constituents (0.01 to 10.0 mg/L)	
Sodium	Bicarbonate	Iron	Carbonate
Calcium	Sulfate	Strontium	Nitrate
Magnesium	Chloride	Potassium	Fluoride
Silica		Boron	
Minor Constituents (0.0001 to 0.1 mg/L)		Trace Constituents (generally less than 0.001 mg/L)	
Antimony	Lead	Beryllium	Ruthenium
Aluminum	Lithium	Bismuth	Scandium
Arsenic	Manganese	Cerium	Silver
Barium	Molybdenum	Cesium	Thallium
Bromide	Nickel	Gallium	Thorium
Cadmium	Phosphate	Gold	Tin
Chromium	Rubidium	Indium	Tungsten
Cobalt	Selenium	Lanthanum	Ytterbium
Copper	Titanium	Niobium	Yttrium
Germanium	Uranium	Platinum	Zirconium
Iodide	Vanadium	Radium	
Zinc			

ในส่วนเกณฑ์คุณภาพน้ำบาดาลเพื่อการบริโภคทางกายภาพ และทางเคมีตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2551 แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลเพื่อการบริโภค [3]

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
ทางกายภาพ	1. สี (Color)	ปลาตินัม-โคบอลต์	5	15
	2. ความขุ่น (Turbidity)	หน่วยความขุ่น	5	20
	3. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	7.0-8.5	6.5-9.2
ทางเคมี	4. เหล็ก (Fe)	mg/L	ไม่เกินกว่า 0.5	1.0
	5. มังกานีส (Mn)	mg/L	ไม่เกินกว่า 0.3	0.5
	6. ทองแดง (Cu)	mg/L	ไม่เกินกว่า 1.0	1.5
	7. สังกะสี (Zn)	mg/L	ไม่เกินกว่า 5.0	15.0
	8. ซัลเฟต (SO ₄)	mg/L	ไม่เกินกว่า 200	250.0
	9. คลอไรด์ (Cl)	mg/L	ไม่เกินกว่า 250	600.0
	10. ฟลูออไรด์ (F)	mg/L	ไม่เกินกว่า 0.7	1.0
	11. ไนเตรด (NO ₃)	mg/L	ไม่เกินกว่า 45	45.0
	12. ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness as CaCO ₃)	mg/L	ไม่เกินกว่า 300	500.0
	13. ความกระด้างถาวร (Non carbonate hardness as CaCO ₃)	mg/L	ไม่เกินกว่า 200	250.0
	14. ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (Total dissolved solids)	mg/L	ไม่เกินกว่า 600	1200.0

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G. Alagumuthu และคณะ [25] ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบแบบกะ โดยใช้หญ้าแพรง ทำให้เป็นแอคติเวตคาร์บอน (activated carbons) ที่ขนาดต่าง ๆ คือ >53 53–106 106–150 150–225 และ 225–303 ไมโครเมตร จากการทดลอง พบว่า สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีที่สุดที่ขนาด 53 ไมโครเมตร เวลา 105 นาที สามารถดูดซับได้ 83.77% ดูดซับฟลูออไรด์ความเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับ 1.25 กรัม ที่พีเอชกลาง ไอออนที่มีผลต่อการดูดซับจากมากไปน้อยคือ $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- \geq \text{NO}_3^-$ กระบวนการดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอม สามารถคืนสภาพได้ 67.4% โดยใช้ 2% โซเดียมไฮดรอกไซด์

Kalimuthu Pandi และ Viswanathan Natrayasamy [26] ทำการพัฒนาตัวดูดซับฟลูออไรด์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ ไม่เป็นพิษ และสามารถย่อยสลายเองได้ โดยใช้แอลจินเนต (alginate Alg) ห่อหุ้มนาโนไฮดรอกซีแอพาไทต์ (nano-hydroxyapatite n-HAp) เรียกตัวดูดซับนี้ว่า n-HApAlg ศึกษาในระบบแบบกะ จากผลการทดลอง พบว่า n-HApAlg สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ 3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยไอโซเทอมของการดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม กระบวนการดูดซับแบบจำลองอันดับสองเทียม

ดวงพร แก่นแก้ว [27] ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำ จากผลการศึกษา พบว่า สัดส่วนที่ดีที่สุดในการผสมระหว่างดินเหนียวกับเถ้าแกลบดำ เพื่อนำมาใช้เป็นสารดูดซับ คือ 3:1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของฟลูออไรด์ คือ 6-7 เวลาสัมผัสนถึงจุดสมดุลคือ 3 ชั่วโมง เมื่อนำมาทดลองกับน้ำบาดาลโดยการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการกรอง 0.1 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลเริ่มต้น 13.81 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีอายุการใช้งานนาน 19 ชั่วโมง จึงหมดประสิทธิภาพ ผลการฟื้นฟูดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำที่หมดสภาพแล้ว โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ซึ่งสามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจนได้ค่ามาตรฐานแต่อายุการใช้งานลดลงจากเดิม

คิวพร โคपालะสุต [10] งานวิจัยนี้พัฒนาเม็ดดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนโรงกรองน้ำเพื่อใช้บำบัดฟลูออไรด์ในน้ำบาดาล โดยเผาตะกอนที่อุณหภูมิ 3 อุณหภูมิ คือ 105 550 และ 1,200 องศาเซลเซียส พบว่า ตะกอนที่เผา 550 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีที่สุด ศึกษาการใช้วัสดุประสาน 5 ชนิดคือ ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ขาว ยิปซัม และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่า ตะกอนโรงกรองน้ำสามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับที่ดีที่สุดเมื่อใช้วัสดุประสานเป็นดินเหนียวโดยมีค่าคงที่ Q° และ b ตามความสัมพันธ์ของแลงเมียร์ มีค่าเท่ากับ 2.14 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.03 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ทดสอบผลของซัลเฟต ไนเตรต คลอไรด์ คาร์บอเนต โซเดียม และ แคลเซียม ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่า ไอออนลบมีผลต่อการดูดซับตามลำดับคือ ไนเตรต > ซัลเฟต > คาร์บอเนต > คลอไรด์ ส่วนโซเดียมและแคลเซียมไม่มีผลต่อการดูดซับ

G Karthikeyan Anitha Pius และ G Alagumuthu [28] ทำการศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยดิน montmorillonite โดยนำดินมาจากคณะธรณีวิทยา วิทยาลัย V.O.C. ประเทศอินเดียมาคัดแยกขนาด 3 ขนาด คือ 75 150 และ 300 ไมครอน ทำการศึกษาการดูดซับในระบบแบบกะใช้ดินปริมาณ 7 กรัม ในสารละลายฟลูออไรด์เข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 ลิตร เขย่าด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 50 นาที พบว่า การใช้ดินขนาด 75 ไมครอน ดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีที่สุด จากนั้นศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ที่ 4 อุณหภูมิ คือ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง ส่วนผลกระทบของพีเอชในช่วง 2-12 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดที่ พีเอช 2 คือ 97 เปอร์เซ็นต์ และลดลงเมื่อพีเอชมีค่ามากขึ้น ศึกษาผลของไอออน พบว่า NO_3^- มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุด รองลงมาเป็น Cl^- ส่วน SO_4^{2-} มีผลเล็กน้อย และจากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตามแบบจำลองแลงเมียร์ และฟรุนดิช ไอโซเทอม พบว่า การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ไอโซเทอมมากกว่า สามารถหาค่า Q° และ b ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ได้เท่ากับ 1.485 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 4.202 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ

X. Fan D.J. Parker และ M.D. Smith [29] ทำการศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วย low cost material พบว่า วัสดุที่สามารดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีเรียงตามลำดับดังนี้ Hydroxyapatite > Fluorspar > Quartz activated using ferric ions > Calcite > Quartz โดยความสามารถการดูดซับฟลูออไรด์ได้มากน้อยนั้นขึ้นกับโครงสร้างและสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับ การดูดซับฟลูออไรด์ของ Hydroxyapatite เกิดจากกระบวนการ ion-exchange ประสิทธิภาพการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของฟรุนดิชไอโซเทอม และแบบจำลองจลนพลศาสตร์สอดคล้องกับลักษณะแบบจำลองอันดับสองเทียม โดยขึ้นกำหนดอัตรา (rate-determining) ของการดูดซับฟลูออไรด์คือขั้น external mass transfer

บทที่ 3
เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ดินที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ดินตะกอน จากโรงงานผลิตน้ำดื่ม หจก. ไอซ์ แอนด์ เพียววอเตอร์ 272 หมู่ 9 ตำบลเวียงชัย อำเภอเวียงชัย จังหวัดเชียงราย

3.1.2 ดินโตะทอไมท์ จากบริษัท ที เค ดินขาว 86 หมู่ 7 ตำบลป่าตัน อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

3.1.3 ดินเหนียว จากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ	แบบ-รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
1. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control shaker)	innova 4000	New Brunswick scientific co., U.S.A.
2. เต้าเผา (Carbolite)	CWF	Scientific Promotion co., LTD.
3. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)	UV-2450	ShimadZu, Japan
4. เครื่องวัดค่าความกรดต่าง (pH meter)	MP220	Mettler Toledo, Switzerland
5. ตู้อบ (Hot air oven)	ULM500	Memmert,Germany
6. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Balance)	PB303-S/FACT	Mettler Toledo
7. X-Ray Diffractometer (XRD)	Model D8 Advance	Bruker AXS,Germany

เครื่องมือ	แบบ-รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
8. X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)	S4 Pioneer wavelength dispersive X- Ray Fluorescence (WDXRF) Spectrometer	Bruker AXS,Germany
9. Simultaneous Thermal Analyzer (STA)	409	Netzsch
10. Surface Area and Porosity Analyzer (BET)	ASAP20000	MICROMERITICS
11. Scanning Electron Microscope (SEM)	JSM-5400	JEOL
12. รางทำยาหลูกกลอน	เบอร์ 33	กฤษฎาสมนไพร
13. ท่ออะคิลิค	เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm	
14. Pump drive	L/S easy-load II 7720260	Masterflex
15. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	Spectrum One	PekinElmer

3.3 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
1. น้ำปราศจากไอออน (Dionized water)	
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	BDH laboratory, England
3. โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF)	Ajax Finechem Pty,Ltd
4. โซเดียม-2- (พาราซัลโฟนิลอะโซ)-1,8-ไฮดรอกซี-3,6-แนพทา ลีนไดซัลโฟเนต (Sodium-2-(parasulphenylazo)-1,8-dihydroxy-3,6-naphthalenedisulfonate (SPADNS) ;C ₁₆ H ₉ Na ₃ O ₁₁ S ₁₃)	Riedel-del Haen
5. เซอร์โคนิลคลอไรด์ออกตะไฮเดรต (Zirconyl chloride octahydrate; ZrOCl ₂ .8H ₂ O)	Fluka, Switzerland
6. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	Ajax Finechem Pty,Ltd
7. โซเดียมไนเตรต (NaNO ₃)	Ajax Finechem Pty,Ltd
8. โซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮดรัส (Na ₂ CO ₃)	Ajax Finechem Pty,Ltd
9. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Na ₂ SO ₄)	Ajax Finechem Pty,Ltd

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมดินสำหรับการทำเม็ดดูดซับ

นำดินตะกอนของโรงงานน้ำดื่มมาละลายน้ำ แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสิ่งปนเปื้อนออกจากดิน และอบที่ 100 องศาเซลเซียส จนดินแห้ง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด นำไปคัดแยกขนาดโดยผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช การเตรียมดินเหนียวก็ทำเช่นเดียวกับดินตะกอนจากโรงงานน้ำดื่ม ส่วนดินโคละทอไม้ก็นำมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปคัดแยกขนาดโดยผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

3.4.2 การขึ้นรูปเม็ดดูดซับ

นำดินที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 มาชั่งตามสัดส่วนโดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน จากนั้นใส่น้ำปราศจากไอออนลงไป ปั่นเป็นทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-3.5 มิลลิเมตร ด้วยรางทำยา ลูกกลอนดังรูปที่ 3.1 นำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม



รูปที่ 3.1 รางทำยา ลูกกลอน

3.4.3 การเตรียมสารละลายฟลูออไรด์

ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายฟลูออไรด์สังเคราะห์ โดยสารละลายฟลูออไรด์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจากโซเดียมฟลูออไรด์ 0.1105 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนจนปริมาตร 500 มิลลิลิตร ส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ใช้น้ำปราศจากไอออนเจือจาง (คิดความเข้มข้นเฉพาะจากฟลูออไรด์ไอออน โดย NaF 41.99 กรัม มี F⁻ 19.00 กรัม)

3.4.4 การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์โดยวิธี SPADNS

3.4.4.1 เตรียมสารละลาย SPADNS ความเข้มข้น 3.75×10^{-3} โมลาร์ โดยละลาย SPADNS 0.5340 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดวัดปริมาตร

3.4.4.2 เตรียมสารละลายเซอร์โคนิล เอซิด (Zirconyl acid) ความเข้มข้น 0.826×10^{-3} โมลาร์ โดยละลาย $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ 0.0665 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดวัดปริมาตร

3.4.4.3 เตรียมสารละลาย Zirconyl acid-SPADNS โดยนำสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.4.1 และข้อ 3.4.4.2 ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

3.4.4.4 เตรียมสารละลายอ้างอิง โดยเติมสารละลาย SPADNS จากข้อ 3.4.4.1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร มาปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วผสมเข้าด้วยกันกับสารละลาย SPADNS สารละลายที่ได้จะนำไปใช้เป็นสารละลายอ้างอิง (reference solution) เพื่อปรับค่าการดูดกลืนแสงให้เท่ากับศูนย์ [30]

3.4.5 สร้างกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์

3.4.5.1 นำสารละลายที่เตรียมจากข้อ 3.4.4.3 ไปบันทึกสเปกตรัมและหาความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max})

3.4.5.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามวิธีข้อ 3.4.3

3.4.5.3 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจาง (dilute) จากสารละลาย ข้อ 3.4.5.2 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.4.5.4 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.0 0.1 0.5 1.0 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสารละลาย 3.4.5.3 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.4.5.5 ปิเปตสารละลายที่เตรียมได้จาก 3.4.5.4 มาความเข้มข้นละ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติมสารละลาย Zirconyl acid-SPADNS ลงไป 2 มิลลิลิตรทุกความเข้มข้น นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer UV-Vis ที่ความยาวคลื่น (λ_{\max}) ที่ได้ จากข้อ 3.4.5.1

3.4.5.6 วาดกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแกน X กับค่าการดูดกลืนแสงในแกน Y

3.4.6 วัดปริมาณฟลูออไรด์ของสารละลายตัวอย่าง

นำสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวัดมา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติมสารละลาย Zirconyl acid-SPADNS ลงไป 2 มิลลิลิตรทุกความเข้มข้น นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer UV-Vis ที่ความยาวคลื่น (λ_{\max}) แล้วนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 3.4.5.6

3.4.7 วิเคราะห์ดินตะกอนและดินไต่อะทอไมท์

3.4.7.1 วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณแร่ธาตุในดินตะกอนและดินไต่อะทอไมท์โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการวิเคราะห์ประมาณ 0.2-20 แอมแปร์ และเวลาที่ใช้วิเคราะห์แต่ละตัวอย่างเท่ากับ 2-10 วินาที

3.4.7.2 วิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบในดินตะกอนและดินไโดอะทอไมท์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) นำดินที่จะวิเคราะห์ปริมาณเล็กน้อยโรยลงบนแผ่น (Plate) สำหรับเตรียมตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์ โดยพยายามเกลี่ยผิวหน้าของดินให้เรียบ ใช้ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ วัดมุม 2θ ตั้งแต่ 3-90 องศา และ scan speed เท่ากับ 2 องศาต่อนาที ในการวิเคราะห์

3.4.7.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA) นำดินตะกอนจากโรงงานและดินไโดอะทอไมท์ก่อนเผาไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA) โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะของก๊าซไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิ 28-850 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.4.7.4 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคของดินตะกอนและดินไโดอะทอไมท์โดย Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยนำดินตัวอย่างที่เป็นผงโรยบนผิวหน้าของโลหะทองแดงทรงกระบอก แล้วนำไปเคลือบผิวของดินตัวอย่างด้วยทอง จากนั้นนำตัวอย่างไปเข้าเครื่องส่อง SEM

3.4.8 หาอุณหภูมิและสัดส่วนที่เหมาะสมในการทำเม็ดดูดซับฟลูออไรด์

ทำการหาสัดส่วนดินในการผสม เพื่อให้สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ปริมาณมากที่สุดโดยการศึกษการทำในระบบแบบกะ ใช้สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใช้เม็ดดูดซับปริมาณ 3 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ในเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ชั่งน้ำหนักดินไโดอะทอไมท์และดินตะกอนที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับตามวิธีข้อ 3.4.2 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 และ 850 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของดินไโดอะทอไมท์กับดินตะกอนทั้งหมด 7 อัตราส่วนคือ 1:0 0:1 4:1 1:4 3:2 2:3 และ 1:1 โดยกำหนดให้สัดส่วนของดินเหนียวเท่ากันทุกอัตราส่วน เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส วัดความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่เหลือด้วยวิธี SPADNS

3.4.9 หาเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์ (Equilibrium Time)

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ในช่วงเวลา 0-360 นาที โดยการศึกษาจะทำในระบบแบบกะ สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใช้เม็ดดูดซับปริมาณ 3 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ในเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างที่ 30 นาทีแรก จากนั้นเก็บทุก ๆ 1 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่เหลือด้วยวิธี SPADNS

3.4.10 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ (Adsorption Isotherm)

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตามความสัมพันธ์ของแลงเมียร์ และฟรุนดิชไอโซเทอม ใช้ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในช่วง 10-60 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ อุณหภูมิคงที่

3.4.10.1 นำฟลูออไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 3.4.3 มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตรความเข้มข้นละ 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.4.10.2 ชั่งเม็ดดูดซับที่เตรียมได้ตามอุณหภูมิและสัดส่วนในการขึ้นรูปเม็ดดูดซับที่หาได้จากวิธี 3.4.8 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.4.10.1 ขวดละ 3 กรัม แล้วนำไปใส่เครื่องเขย่าความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที ใช้เวลาในเครื่องเขย่าด้วยเวลาสมดุล (Equilibrium Time) ที่หาได้จากวิธี 3.4.9

3.4.10.3 เมื่อครบเวลาสมดุล (Equilibrium Time) รินสารละลายใสออกจากขวดรูปชมพู่เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่เหลือด้วยวิธี SPADNS

3.4.11 ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายฟลูออไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ

3.4.11.1 ปรับน้ำปราศจากไอออนเป็น พีเอช 2 พีเอช 4 พีเอช 7 พีเอช 10 และพีเอช 14 โดยที่พีเอช 2 และพีเอช 4 ใช้กรดไฮโดรคลอริกในการปรับพีเอช ส่วนพีเอช 10 และพีเอช 14 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับ ในส่วนพีเอช 7 เป็นพีเอชของน้ำปราศจากไอออน

3.4.11.2 นำน้ำปราศจากไอออนที่ปรับพีเอชแล้วจากข้อ 3.4.11.1 มาเตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชละ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แต่ละขวดรูปชมพู่ใส่เม็ดดูดซับที่เตรียมได้ตามอุณหภูมิและสัดส่วนในการขึ้นรูปเม็ดดูดซับที่หาได้จากวิธี 3.4.8 จำนวน 3 กรัม นำขวดรูปชมพู่ใส่ในเครื่องเขย่าความเร็ว 110 รอบต่อนาที ด้วยเวลาสมดุล (Equilibrium Time) เมื่อครบเวลา รินสารละลายใสไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่โดยวิธี SPADNS

3.4.12 ศึกษาผลของไอออนลบที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ

ทำการศึกษาผลของไอออนลบ ได้แก่ NO_3^- SO_4^{2-} CO_3^{2-} Cl^- การทดลองไอออนแต่ละตัว เปลี่ยนความเข้มข้นไอออน 5 ความเข้มข้น คือ 0 200 400 600 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแต่ละความเข้มข้นใช้ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมือนกันทุกอัน โดยทำการทดลองที่ละไอออน ไอออนละ 5 ความเข้มข้นแต่ละไอออนเตรียมลักษณะเดียวกันดังนี้

3.4.12.1 เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากวิธี 3.4.3

3.4.12.2 เตรียมสารละลายของไอออนลบความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) ไนเตรตไอออน (NO_3^-) 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจาก โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) หนัก 0.6860 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนจน 500 มิลลิลิตร (คิดความเข้มข้นเฉพาะจากไนเตรตไอออนโดย NaNO_3 หนัก 84.995 กรัม มี NO_3^- หนัก 62.00 กรัม)

2) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจาก โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Na_2SO_4) หนัก 0.7398 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนจน 500 มิลลิลิตร (คิดความเข้มข้นเฉพาะจากซัลเฟตไอออนโดย Na_2SO_4 หนัก 142.04 กรัม มี SO_4^{2-} หนัก 96.00 กรัม)

3) คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจาก โซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮดรัส (Na_2CO_3) หนัก 0.8833 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนจน 500 มิลลิลิตร (คิดความเข้มข้นเฉพาะจากคาร์บอเนตไอออนโดย Na_2CO_3 105.99 กรัม มี CO_3^{2-} 60.00 กรัม)

4) คลอไรด์ไอออน (Cl^-) 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจาก โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หนัก 0.8231 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนจน 500 มิลลิลิตร (คิดความเข้มข้นเฉพาะจากคลอไรด์ไอออนโดย NaCl หนัก 58.44 กรัม มี Cl^- 35.50 กรัม)

3.4.12.3 เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ที่มีไอออนต่าง ๆ ไอออนละ 5 ความเข้มข้น โดยปริมาตรในการผสมแต่ละความเข้มข้นแสดงดังตารางที่ 3.3

3.4.12.4 ชั่งน้ำหนักเม็ดดูดซับประมาณ 3 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยแต่ละขวดใส่สารละลายฟลูออไรด์ที่มีไอออนรบกวนในปริมาณต่าง ๆ กันจาก ข้อ 3.4.12.3 ขวดละ 100 มิลลิลิตร

3.4.12.5 นำขวดรูปชมพู่ทั้ง 5 ขวดไปเขย่าด้วยความเร็ว 110 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลารินสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ด้วยวิธี SPADNS

ตารางที่ 3.3 ปริมาตรในการผสมให้ได้ความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ

ความเข้มข้นไอออนสุดท้าย (mg/L)	ปริมาตร 100 mg/L F ⁻ ที่ต้องใช้ (mL)	ปริมาตร 1,000 mg/L ของไอออนที่ต้องใช้ (mL)	น้ำปราศจากไอออน (mL)
0	25	0	225
200	25	50	175
400	25	100	125
600	25	150	75
800	25	200	25

3.4.13 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ

ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับที่สภาวะอุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

3.4.13.1 สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.4.13.2 ชั่งเม็ดดูดซับปริมาณ 3 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปใส่ในเครื่องเขย่าตั้งอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่เหลือด้วยวิธี SPADNS

3.4.13.3 ทำการทดลองซ้ำเหมือนข้อ 3.4.13.1 และ 3.4.13.2 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในเครื่องเขย่าเป็น 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.4.14 วิเคราะห์เม็ดดูดซับ

3.4.14.1 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในเม็ดดูดซับโดยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในเม็ดดูดซับก่อนดูดซับฟลูออไรด์ และหลังดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการวิเคราะห์ประมาณ 0.2-20 แอมแปร์ และเวลาที่ใช้วิเคราะห์แต่ละตัวอย่างเท่ากับ 2-10 วินาที

3.4.14.2 วิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพของเม็ดดูดซับด้วยเครื่อง Surface Area – Analyzer เป็นเทคนิคการหาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวอย่างโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ก่อนที่จะนำเม็ดดูดซับไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Surface Area –Analyzer ต้องนำเม็ดดูดซับไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นก่อนนำไปวิเคราะห์

3.4.15 การวัดการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ

เม็ดดูดซับสามารถทำการฟื้นฟูสภาพการดูดซับโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลาร์เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.04 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 1 ลิตร ทำการทดสอบการดูดซับของเม็ดดูดซับในท่ออะคลิลิคเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยนำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรไหลผ่านเม็ดดูดซับ ทำการเก็บน้ำตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเปลี่ยนจากสารละลายฟลูออไรด์เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้แทน ทำการเก็บน้ำตัวอย่างทุก 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นน้ำไหลผ่านจนสารละลายเป็นกลาง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างทุก 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเช่นเดิม รูปการติดตั้งคอลัมน์ที่ใช้ในการวัดการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งคอลัมน์ที่ใช้ในการวัดการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ
 (ก) ถังบรรจุสารละลายฟลูออไรด์/สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ข) ปั๊มน้ำ
 (ค) คอลัมน์บรรจุเม็ดดูดซับ (ง) จุดเก็บน้ำ

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การเตรียมดินสำหรับการทำเม็ดดูดซับ

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเม็ดดูดซับฟลูออไรด์จากดินตะกอนของโรงงานผลิตน้ำดื่ม และดินไดอะทอมไมท์ โดยมีดินเหนียวเป็นตัวประสาน มีขั้นตอนการเตรียมดินก่อนขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับ ดังนี้

4.1.1 การเตรียมดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่ม

ดินตะกอนที่นำมาจากโรงงานผลิตน้ำดื่มมีสิ่งสกปรกปนอยู่ ได้แก่ กรวด ทราย และเศษใบไม้ จึงต้องนำดินตะกอนมากำจัดสิ่งสกปรกออกก่อน โดยนำดินตะกอนของโรงงานน้ำดื่มมาละลายน้ำ แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสิ่งปนเปื้อนออกด้วยตะแกรง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนดินแห้ง ดังรูปที่ 4.1 รอให้ดินเย็น แล้วนำไปบดให้ละเอียด นำไปคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงขนาด 100 ไมโคร (149 ไมครอน หรือเท่ากับ 0.149 มิลลิเมตร) ได้เป็นผงดินตะกอนละเอียดสีน้ำตาลอมแดง แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ดินตะกอนจากโรงงานน้ำดื่มหลังจากอบแห้ง



รูปที่ 4.2 ดินตะกอนที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 ไมโคร

4.1.2 การเตรียมดินไคอะทอไมท์

นำดินไคอะทอไมท์จากบริษัท ที เค ดินขาว จังหวัดลำปาง ลักษณะเป็นก้อนไปบดให้ละเอียด แล้วนำไปคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช จะได้เป็นผงดินไคอะทอไมท์สีเหลืองนวล แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ดินไคอะทอไมท์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

4.1.3 การเตรียมดินเหนียว

นำดินเหนียวที่มีความชื้น และมีเศษสิ่งสกปรกต่าง ๆ ปนอยู่ ได้แก่ กรวด ทราย และเศษใบไม้ มากำจัดสิ่งสกปรกออกก่อน โดยนำดินเหนียวมาละลายน้ำ แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสิ่งปนเปื้อนออกด้วยตะแกรง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนดินแห้ง รอให้ดินเย็นแล้วนำไปบดให้ละเอียด นำไปคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช ได้เป็นผงดินเหนียวสีน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ดินเหนียวที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

4.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุในดินตะกอน และดินไคอะทอไมท์โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

นำผงดินตะกอน และดินไคอะทอไมท์ที่เตรียมได้จากผลการวิจัยข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 ตามลำดับ มาวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุโดยเทคนิค XRF พบว่า ดินตะกอน และดินไคอะทอไมท์ ในสภาวะก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง จะมีปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ อยู่ในปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ในดินตะกอนมี Fe_2O_3 อยู่ปริมาณมากที่สุด คือประมาณ 58.20 % รองลงมาคือ SiO_2 23.6 % CaO 9.63 % Al_2O_3 4.31 % P_2O_5 0.88 % และ K_2O 0.60 % ตามลำดับ แสดงดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแร่ธาตุในดินตะกอนจากการวิเคราะห์ด้วย XRF

สารดูดซับ	ความเข้มข้น (%wt)											
	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	K_2O	MnO	Cl	MgO	BaO	TiO_2	ZnO
ดินตะกอน ก่อนเผา	58.20	23.60	9.63	4.31	0.88	0.77	0.60	0.55	0.55	0.30	0.27	0.20
ดินตะกอนหลัง เผา 550 °C	56.90	24.60	9.73	4.65	0.86	0.79	0.58	0.51	0.55	0.30	0.27	0.19
ดินตะกอนหลัง เผา 850 °C	57.30	24.30	9.90	4.65	0.79	0.81	0.59	0.17	0.54	0.32	0.27	0.18

ในขณะที่ดินไคอะทอไมท์ มีปริมาณ SiO_2 มากที่สุด คือประมาณ 81.80 % ทำให้พื้นผิวส่วนใหญ่ของดินไคอะทอไมท์เป็นหมู่ silanol group ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วได้ [31] รองลงมาคือ Al_2O_3 12.0 % Fe_2O_3 3.35 % K_2O 1.66 % และ Ti_2O 0.44 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

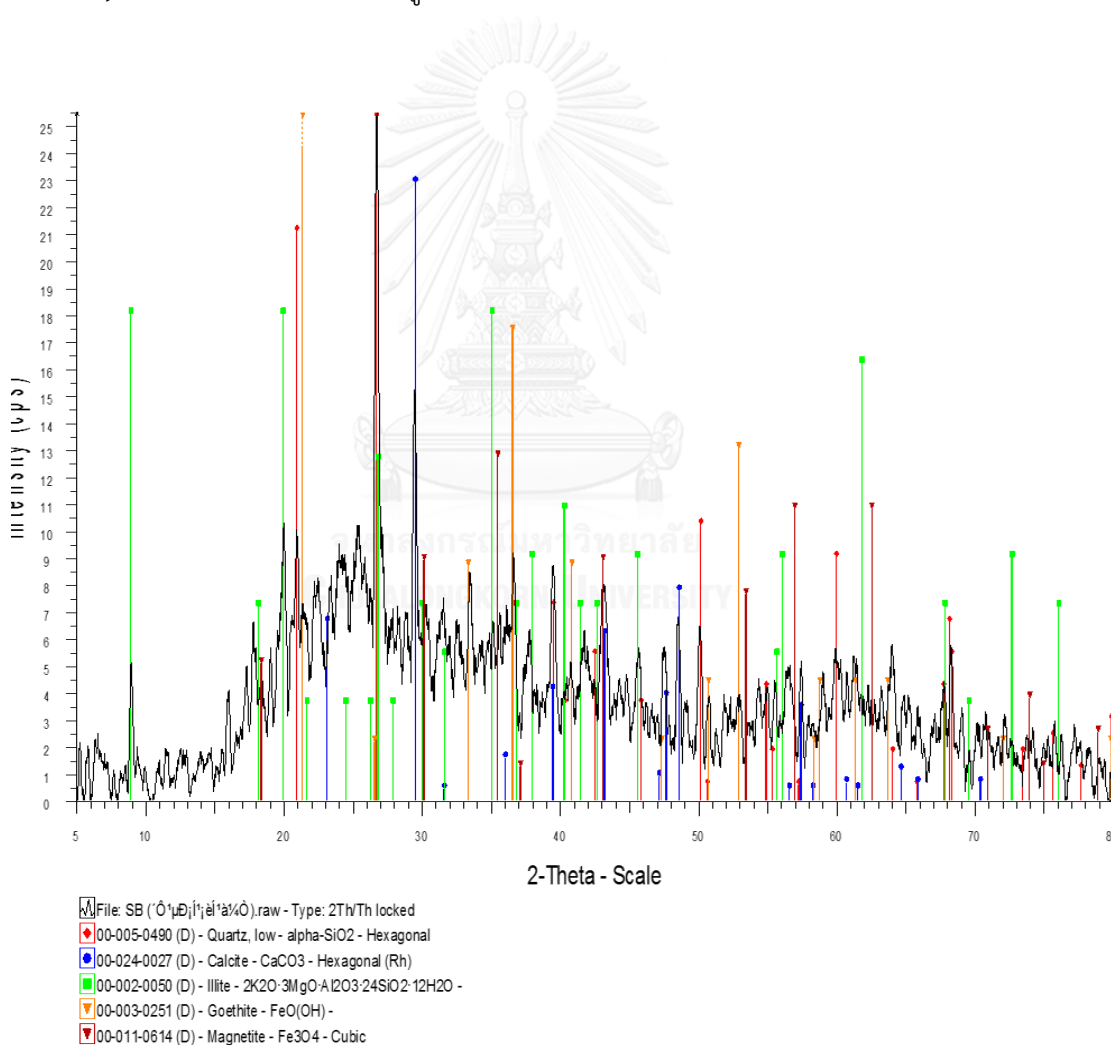
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแร่ธาตุในดินไคอะทอไมท์จากการวิเคราะห์ด้วย XRF

สารดูดซับ	ความเข้มข้น (%wt)						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	CaO
ดินไคอะทอไมท์ก่อนเผา	81.80	12.00	3.35	1.66	0.44	0.38	0.33
ดินไคอะทอไมท์หลังเผา 550 °C	81.60	12.10	3.33	1.63	0.43	0.39	0.33
ดินไคอะทอไมท์หลังเผา 850 °C	82.00	12.10	3.10	1.59	0.40	0.39	0.32

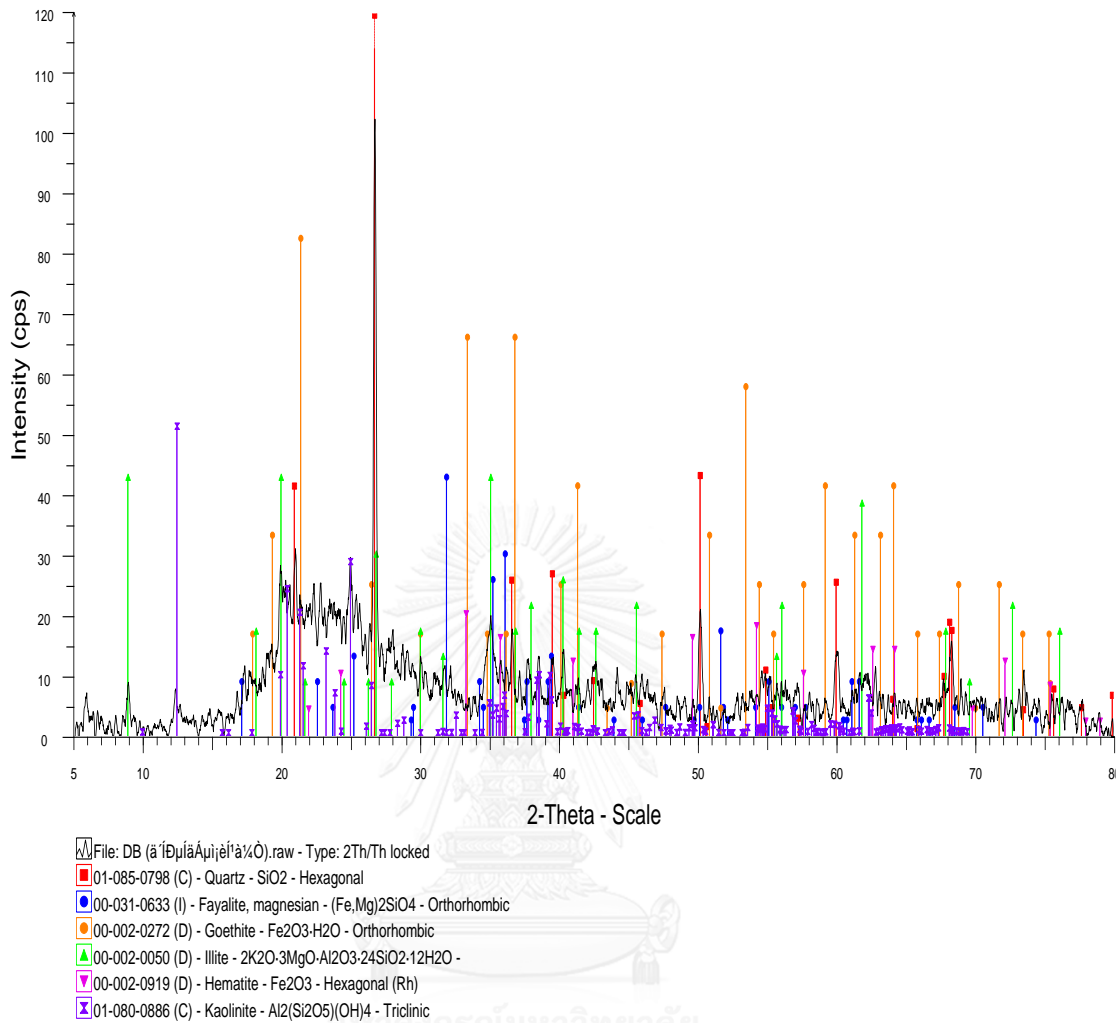
4.3 วิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบในดินตะกอนและดินไโดอะทอไมท์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ในหัวข้อ 4.2 ทำให้ทราบชนิด และปริมาณของแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดินแต่ละชนิด ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อหาชนิดของสารประกอบในดินด้วยเครื่อง XRD เพื่อตรวจสอบลักษณะการรวมตัวของแร่ธาตุเหล่านี้

ผลจากการวิเคราะห์สารประกอบในดินตะกอน และดินไโดอะทอไมท์ในสภาวะก่อนเผาจากการค้นหาจากฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS โดยใช้ License ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ผลการวิเคราะห์ แสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Intensity และค่า 2 theta แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



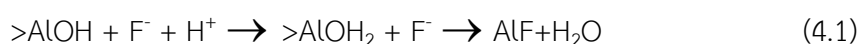
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์สารประกอบในดินตะกอน



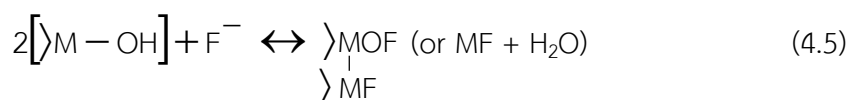
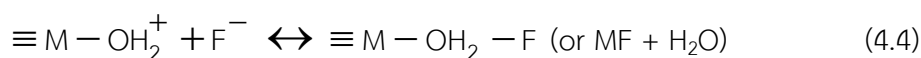
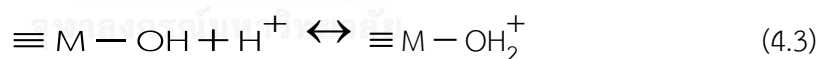
รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์สารประกอบในดินโดะทอไมท์

จากรูปที่ 4.5 จะได้ว่าดินตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สารกลุ่ม Quartz low-alpha-SiO₂-Hexagonal Calcite-CaCO₃-Hexagonal Illite-2K₂O₃·3MgO·Al₂O₃·24SiO₂·12H₂O-Goethite-FeO(OH)- Magnetite-Fe₃O₄-Cubic เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนดินโดะทอไมท์ประกอบด้วยสารกลุ่ม Quartz-SiO₂ - Hexagonal Fayalite magnesian-(Fe,Mg)₂ SiO₄ - Orthorhombic Goehite-Fe₂O₃·H₂O-Orthorhombic Illite-2K₂O·3MgO·Al₂O₃·24SiO₂·12H₂O-Hematite-Fe₂O₃-Hexagonal Kaolinite-Al₂(Si₂O₅)(OH)₄-Triclinic เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงดังรูปที่ 4.6

การดูดซับฟลูออไรด์ไอออนในดินตะกอนและดินไคอะทอไมท์ อาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออน F^- กับ Al^{3+} ในโครงสร้างของ Illite ที่มีอยู่ในดินตะกอน และ Kaolinite ที่อยู่ในดินไคอะทอไมท์ ซึ่งเมื่อฟลูออไรด์ไอออนเข้าไปแทนที่ภายในโครงสร้างของ Illite และ Kaolinite แสดงดังสมการ 4.1 หรือ 4.2 ซึ่งอธิบายตามงานวิจัย Adsorption of fluoride on clay minerals and their mechanisms using X-ray photoelectron spectroscopy ของ Junyi DU และคณะ [20]

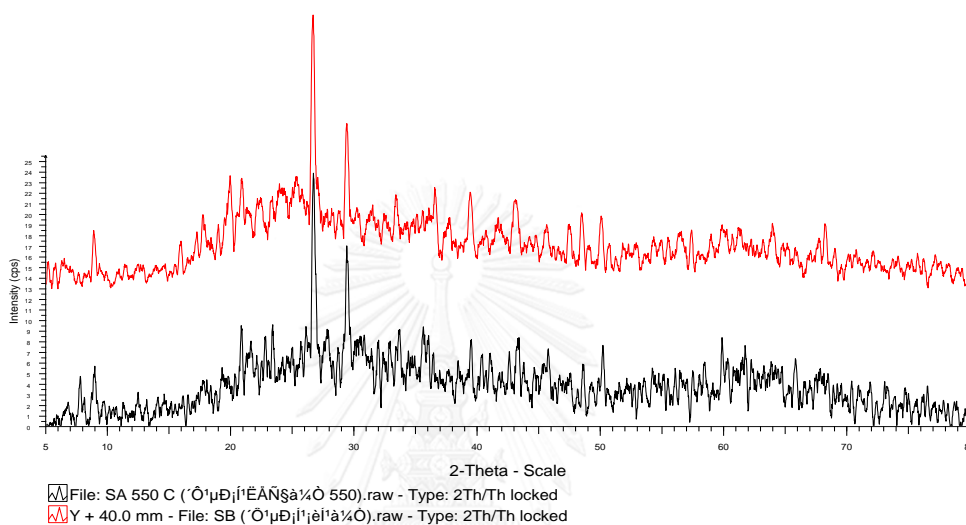


และนอกจากการดูดซับที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง F^- กับ Al^{3+} แล้วหนังสือ Advances in Fluorine Science เรียบเรียงโดย Alain Tressaud [32] อธิบายการดูดซับฟลูออไรด์ของ red mud สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง F^- กับ Al^{3+} , Fe^{3+} และ Si^{2+} ได้เช่นกัน แสดงดังสมการ 4.3 4.4 และ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu Xiaojing และคณะ พบว่า ดินที่มีส่วนประกอบของเหล็ก อะลูมิเนียม สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ [4] ดังนั้นกลไกการดูดซับของเม็ดดูดซับจากงานวิจัยนี้ ที่ทำขึ้นจากดินตะกอนผสมดินไคอะทอไมท์ มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียม เหล็ก และซิลิคอน ควรจะเป็นดังกลไกการดูดซับ ดังสมการ 4.3 4.4 และ 4.5 เช่นกัน

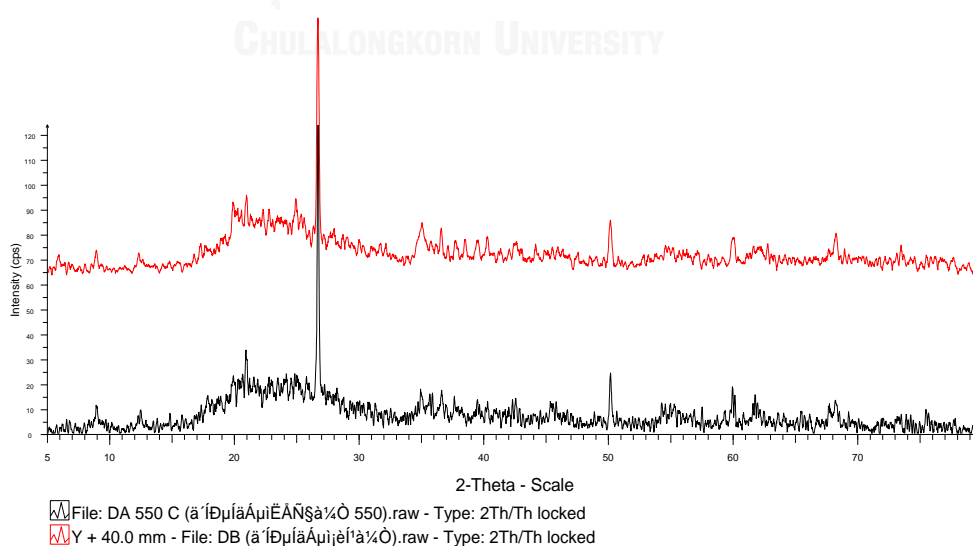


เมื่อ M คือ metal ion (Al Fe or Si)

ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ XRD ของดินตะกอนและดินไต่ะทอไม้ท์ก่อนเผาและหลังเผา 550 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างเฟสไม่เปลี่ยน แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ดังนั้น อุณหภูมิการเผาที่ 550 องศาเซลเซียส จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างเฟสของดินตะกอนและดินไต่ะทอไม้ท์ แต่มีผลต่อสารอินทรีย์และสารที่ระเหยได้อื่น ๆ ดังผลการทดลองข้อ 4.4 ที่ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer



รูปที่ 4.7 ผล XRD ของดินตะกอนก่อนเผาและดินตะกอนหลังเผา 550 องศาเซลเซียส



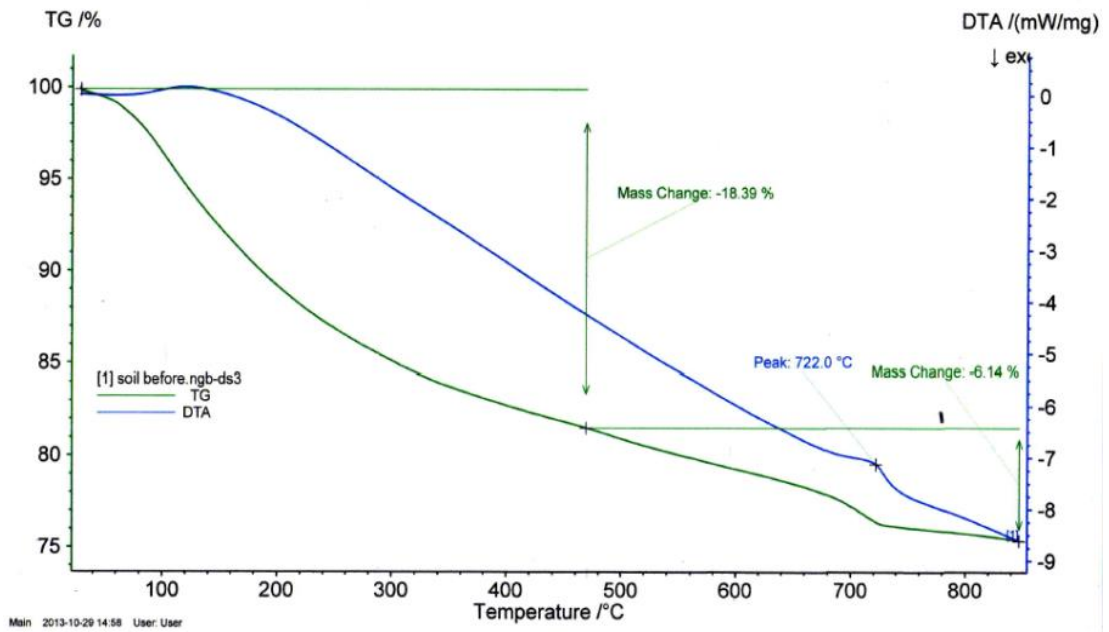
รูปที่ 4.8 ผล XRD ของดินไต่ะทอไม้ท์ก่อนเผาและดินไต่ะทอไม้ท์หลังเผา 550 องศาเซลเซียส

4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA)

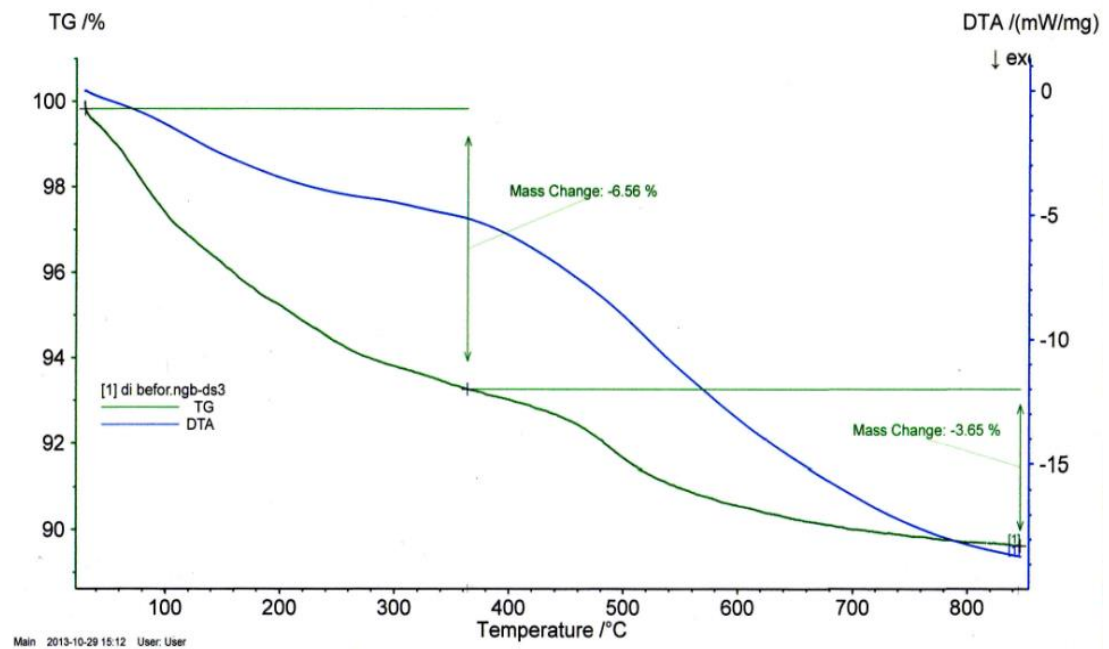
เมื่อนำดินตะกอนและดินไต่ตะกอนมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA) โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะของก๊าซไนโตรเจนตั้งแต่อุณหภูมิ 28-850 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ทั้งดินตะกอนและดินไต่ตะกอนเกิดการเปลี่ยนแปลงที่น่าสนใจอยู่สองช่วงอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ เนื่องจากในโครงสร้างทางเคมีของดินจะมีสารชนิดต่าง ๆ อยู่ในเนื้อดิน เช่น สารประกอบของคาร์บอน สารประกอบเหล็ก สารประกอบแมกนีเซียม สารประกอบซิลเฟต และน้ำ เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้สามารถสลายตัวเป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ ได้ เมื่อนำดินไปผ่านความร้อน ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะส่งผลให้สารประกอบเหล่านี้เกิดการแตกตัวออกจากโครงสร้างทางเคมี เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.3 ส่วนน้ำที่อยู่ในโครงสร้างทางเคมี หรือเป็นไอน้ำที่อยู่ในบรรยากาศที่เข้าไปอยู่ในเนื้อดิน โดยทั่วไปดินจะมีความชื้นประมาณ 10 - 14 % ในรูปของความชื้นอยู่นอกโครงสร้างทางเคมี ซึ่งสามารถกำจัดออกได้ในอุณหภูมิปกติ หรือเมื่อใช้ความร้อนเช่นกัน [8]

ตารางที่ 4.3 แสดงการสลายตัวของอุณหภูมิต่าง ๆ ของโครงสร้างทางเคมีของสารที่อยู่ในดิน [8]

อุณหภูมิที่สลายตัว (°C)	ปฏิกิริยาของการสลายตัว
300-450	$\text{FeS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{SO}_2$
500-800	$4\text{FeS} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2$
560-775	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{SO}_3$
ตั้งแต่ 350	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
250-920	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$
600-1,050	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
400-900	$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$
ตั้งแต่ 800	$\text{FeCO}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{CO}_2$
1,250-1,300	$\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3$



รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ STA ของดินตะกอน



รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ STA ของดินไต่อะทอไมท์

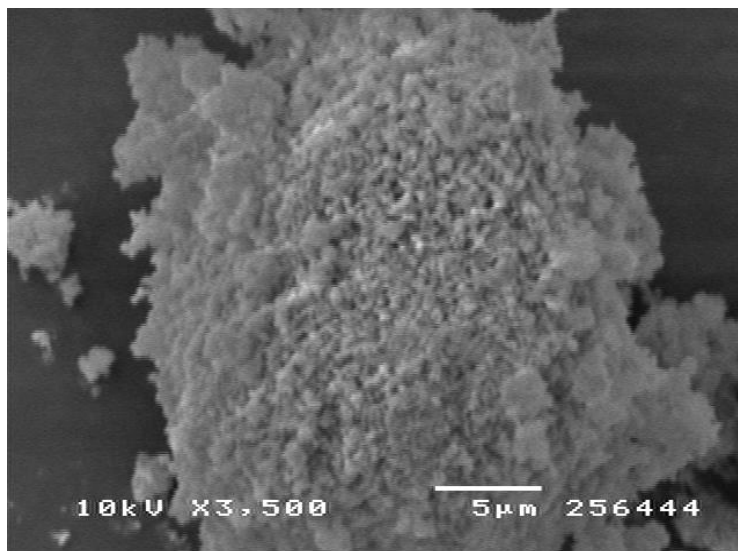
จากรูปที่ 4.9 จะได้ว่าดินตะกอนเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของดินอยู่สองช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงแรกอุณหภูมิ 30-470 องศาเซลเซียส ดินเกิดการสูญเสียน้ำหนักไปประมาณ 18.39 % ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำ (Dehydration) ภายในดิน แม้ว่า จะทำการอบดินที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์แล้วก็ตาม แต่ยังมีน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างดินที่ยังระเหยออกไปไม่หมด จึงมีการระเหยออกไปในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้น้ำหนักลดลงเล็กน้อย ส่วนช่วงที่สองเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิ 470-850 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าน้ำหนักของดินหายไปประมาณ 6.14 % ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน เช่น FeS และ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2$ เกิดการสลายตัวได้ Fe_2O_3 คาร์บอน (C) ซัลเฟอร์ (S) กลายเป็นก๊าซ CO_2 และ SO_2 MgCO_3 เปลี่ยนเป็น MgO เป็นต้น [8] ดังสมการในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้ผลของการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดในลักษณะเดียวกันในดินโดอะทอไมท์ ซึ่งจะมีการสูญเสียในช่วงแรกจากการระเหยของน้ำ (Dehydration) ภายในดิน ที่อุณหภูมิ คือ 30-360 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน ที่อุณหภูมิ 360-850 องศาเซลเซียส แสดงดังในรูปที่ 4.10 และได้สรุปการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนจากการวิเคราะห์ดินตะกอนและดินโดอะทอไมท์โดยเครื่อง STA ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนของดินตะกอนและดินโดอะทอไมท์โดยเครื่อง STA

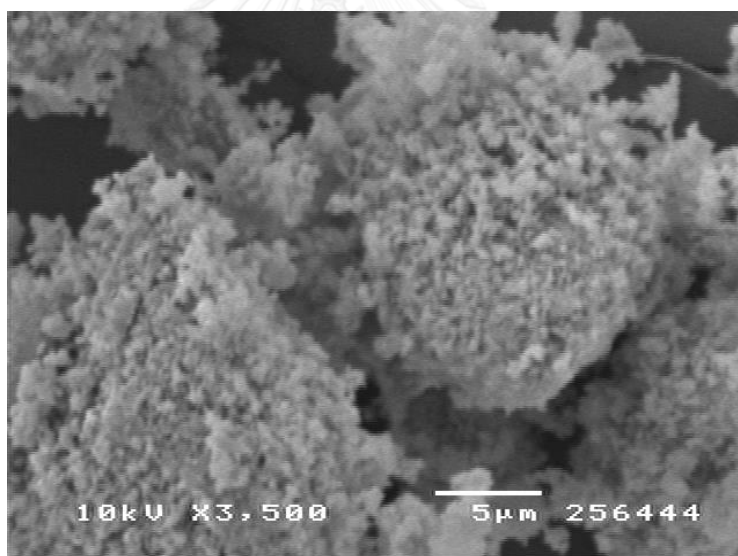
ตัวอย่าง	ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว (°C)	ตำแหน่ง Peak	% wt loss	%wt char (Undecomposed material)
ดินตะกอน	30-470	130	-18.39	75
	470-850	722	-6.14	
ดินโดอะทอไมท์	30-360	240	-6.56	89.5
	360-850	460	-3.65	

4.5 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคดินตะกอนและดินโดอะทอไมท์โดย Scanning Electron Microscopy (SEM)

เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของดินตะกอนและดินโดอะทอไมท์ก่อนเผา และหลังเผา 550 องศาเซลเซียส ให้ชัดเจนมากขึ้นจึงทำการถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย x3,500 ได้ภาพของดินตะกอนก่อนเผาและหลังเผา 550 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

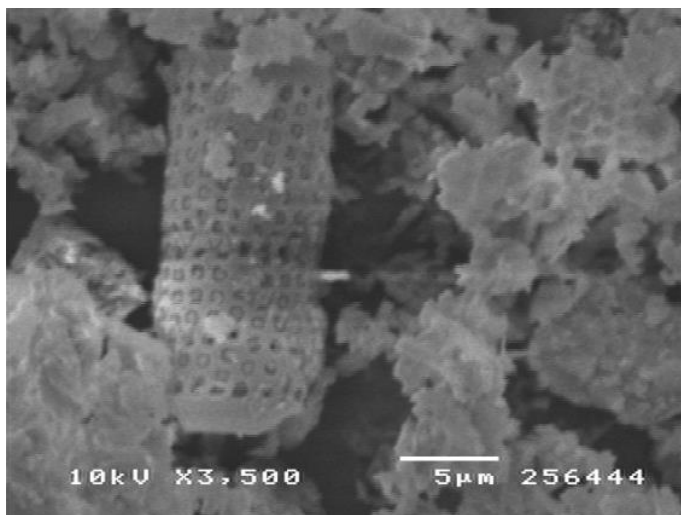


รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนโรงงานก่อนเผา

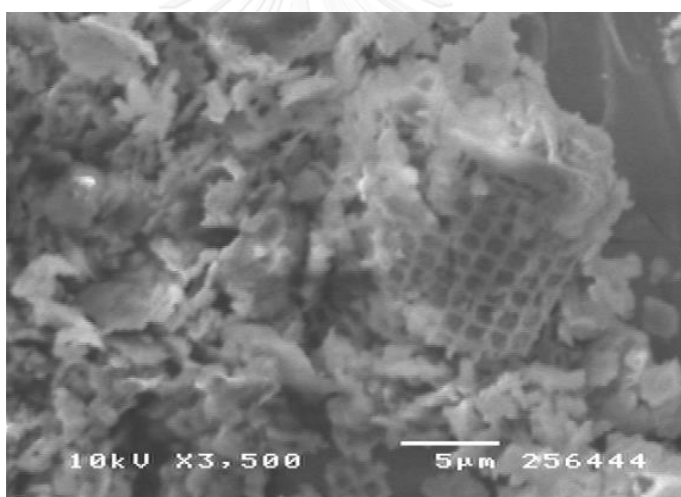


รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนหลังเผา 550 องศาเซลเซียส

หลังจากได้ศึกษาลักษณะของอนุภาคของดินตะกอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย SEM แล้วทำให้ทราบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น อนุภาคจะมีการจับตัวกันแน่นมากขึ้น ส่วนภาพถ่ายจาก SEM ของดินไต่อะทอไมท์ก่อนเผาและหลังเผา 550 องศาเซลเซียส กำลังขยาย x3,500 แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของดินไคอะทอไมต์ก่อนเฝ้า



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของดินไคอะทอไมต์หลังเฝ้า 550 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าดินไคอะทอไมต์ก่อนเฝ้ามีโครงสร้างเป็นตะขวยทรงกระบอก มีตะกอนรอบข้างเป็นปุยสีขาว ส่วนรูปที่ 4.14 ดินไคอะทอไมต์หลังเฝ้า 550 องศาเซลเซียส โครงสร้างตะขวยทรงกระบอกจะแตกเล็กน้อยผลิตรอบข้างเกาะกันแน่นขึ้น ลักษณะโครงสร้างดินไคอะทอไมต์ที่เป็นตาข่ายนั้นจะทำให้เนื้อดินมีรูพรุนค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการเป็นตัวดูดซับที่ดี จากผลการวิจัยดังกล่าว คาดว่าหลังจากที่เฝ้าดินตะกอนและดินไคอะทอไมต์ 550 องศาเซลเซียส จะทำให้อนุภาคของดินจับกันแน่นขึ้น สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ติดอยู่กับอนุภาคของตะกอนสลายตัวและหลุดออกจากพื้นผิวของอนุภาคตะกอน ทำให้ตะกอนมีความสามารถในการดูดซับได้อย่างเต็มที่

4.6 การขึ้นรูปเม็ดดูดซับ

เมื่อนำสัสด่วนดินต่าง ๆ มาผสมให้เข้ากัน แล้วนำมาปั้นเป็นทรงกลมด้วยรางปั้นยาลูกกลอน จากนั้นนำไปเผาจะได้เม็ดดูดซับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-3.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.15

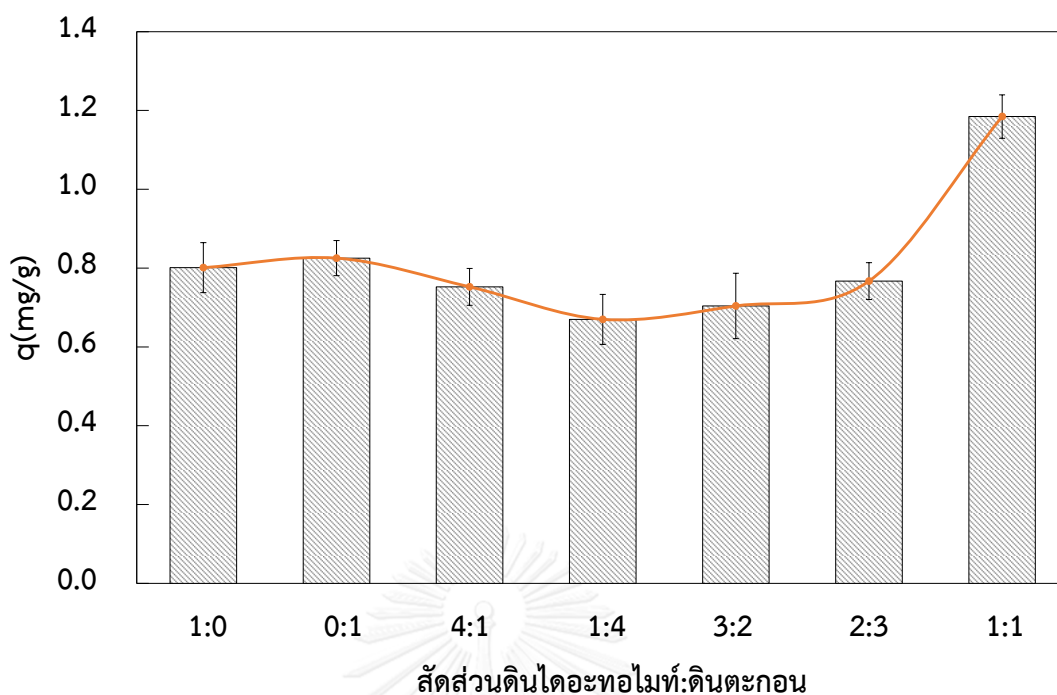


รูปที่ 4.15 เม็ดดูดซับฟลูออไรด์

4.7 อุณหภูมิและสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดดูดซับ

ผลของการขึ้นรูปเม็ดดูดซับฟลูออไรด์สัสด่วนโดยน้ำหนักของดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอน เท่ากับ 1 ต่อ 1 เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อใส่ลงในสารละลายฟลูออไรด์ เม็ดดูดซับจะแตกออกทันที จากนั้นจึงนำเม็ดดูดซับสัสด่วนโดยน้ำหนักของดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอน เท่ากับ 1 ต่อ 1 ไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่า เม็ดดูดซับสามารถคงรูปได้เมื่อใส่ลงในสารละลายฟลูออไรด์ แต่ดูดซับฟลูออไรด์ได้ไม่ดีนัก เนื่องจากอุณหภูมิจึงเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ดินสุกตัว เนื้อดินจะมีความแข็งแรงแรงมากแต่ความพรุนจะน้อยลง จึงทำการเพิ่มดินเหนียวลงในส่วนผสมเพื่อเป็นตัวประสานในการขึ้นรูปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

สำหรับการทดลองในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับฟลูออไรด์ที่ผลิตจากการผสมของดินไคอะทอไมท์กับดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่ม เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ในสัดส่วนต่าง ๆ กันจำนวน 7 สัดส่วน คือ ดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอน เท่ากับ 1:0 0:1 4:1 1:4 3:2 2:3 และ 1:1 ตามลำดับ โดยใช้ดินเหนียวเป็นตัวประสานในสัดส่วนคงที่เท่ากับ 0.5 ตามวิธีดำเนินการวิจัยในข้อ 3.4.8 โดยทำในระบบแบบกะ ใช้น้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการดูดซับเท่ากันคือ 4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณการดูดซับของเม็ดดูดซับสัดส่วนต่าง ๆ

จากผลการหาสัดส่วนดินไคอะทอไมท์กับดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่ม ขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับ เเผที่อุณหภูมิตั้งที่ 550 องศาเซลเซียส พบว่า สัดส่วนดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอนในสัดส่วนต่าง ๆ มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่แตกต่างกัน เป็นปัจจัยในเรื่องการเกาะตัวของเนื้อดินทั้งสองชนิด โดยถ้าหากมีดินไคอะทอไมท์สัดส่วนที่มากกว่า (สัดส่วนดินไคอะทอไมท์:ดินตะกอน เท่ากับ 1:0 4:1 และ 3:2) หรือดินตะกอนในอัตราส่วนที่มากกว่า (สัดส่วนดินไคอะทอไมท์:ดินตะกอน เท่ากับ 0:1 1:4 และ 2:3) นั้นจะมีผลทำให้เนื้อดินจะมีลักษณะการเกาะตัวที่แน่นจนทำให้พื้นที่ผิวของเม็ดดูดซับลดน้อยลง ดังนั้นสัดส่วนที่ดินไคอะทอไมท์และดินตะกอนเกาะตัวกันได้ดี และมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงสุดคือ ดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอน เท่ากับ 1 ต่อ 1 แสดงดังรูปที่ 4.16 มีปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ 1.18 มิลลิกรัมต่อเม็ดดูดซับ 1 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละการดูดซับฟลูออไรด์เท่ากับ 69.91 เมื่อความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้นสัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมมากที่สุดในการทำเม็ดดูดซับคือ ดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอนต่อดินเหนียว เท่ากับ 1 ต่อ 1 ต่อ 0.5 ตามลำดับ เเผที่อุณหภูมิตั้งที่ 550 องศาเซลเซียส โดยที่จะนำสัดส่วนและอุณหภูมิในการขึ้นรูปเม็ดดูดซับนี้ใช้ในการทำวิจัยต่อไป ส่วนความสามารถในการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับฟลูออไรด์ คำนวณได้จากสมการที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (4.6)$$

$$\% \text{Adsorption} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (4.7)$$

เมื่อ	q	หมายถึง ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ (mg/g)
	C ₀	หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ (mg/L)
	C _e	หมายถึง ความเข้มข้นสมดุลของฟลูออไรด์ (mg/L)
	V	หมายถึง ปริมาตรของสารละลายฟลูออไรด์ (cm ³)
	W	หมายถึง น้ำหนักของเม็ดดูดซับ (g)

เมื่อนำดินเหนียวเพียงอย่างเดียวมาทำการขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่า สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้เช่นกัน แต่ดูดซับได้ในปริมาณที่น้อย คิดเป็นร้อยละต่อการดูดซับฟลูออไรด์เท่ากับ 4.322

4.8 สมบัติทางกายภาพของเม็ดดูดซับด้วยเครื่อง Surface Area-Analyzer

ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเม็ดดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปเม็ดดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์อย่างไร จากการศึกษาหาพื้นที่ผิวของเม็ดดูดซับเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Surface Area -Analyzer พบว่า เม็ดดูดซับที่ขึ้นรูปด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 42.12 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าเมื่อเผาเม็ดดูดซับที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยพื้นที่ผิวของเม็ดดูดซับมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ คือถ้าเม็ดดูดซับมีพื้นที่ผิวมากย่อมทำให้เม็ดดูดซับมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มากกว่าเม็ดดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลทำให้เม็ดดูดซับฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าเม็ดดูดซับฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

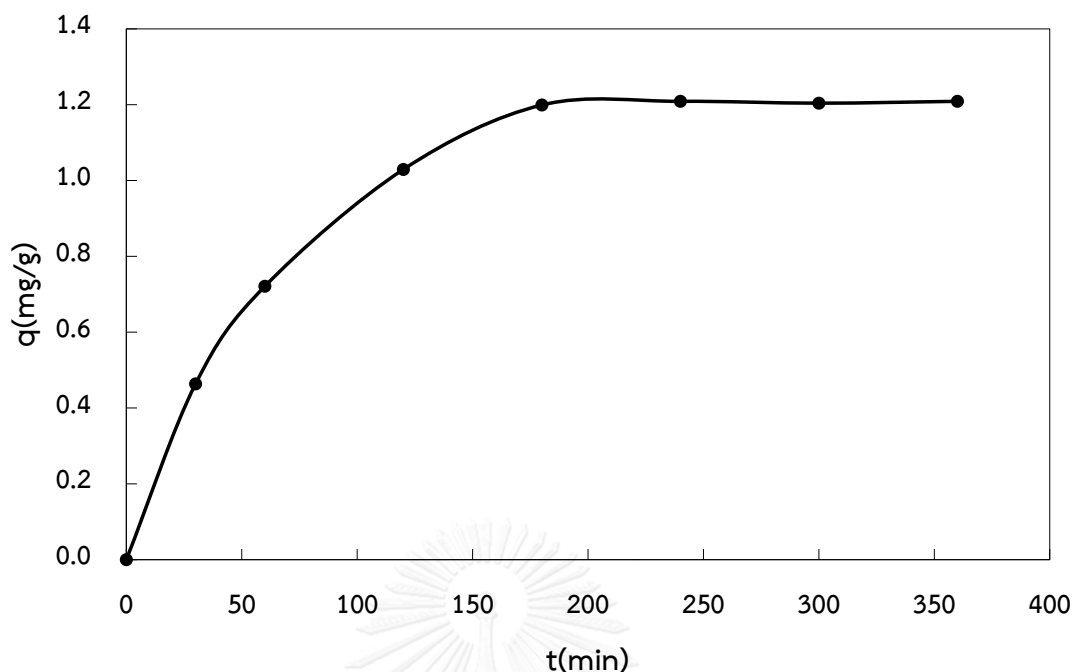
นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Surface Area –Analyzer พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของเม็ดดูดซับเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยขนาดรูพรุนทั้ง 2 อุณหภูมิ มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของฟลูออไรด์ไอออน (~0.0266 อังสตรอม) และจัดอยู่ในประเภท มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชันนัลพอร์ (transitional pore) [12] และในขณะเดียวกันปริมาตรรูพรุนของเม็ดดูดซับเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีปริมาณมากกว่าเม็ดดูดซับเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส สมบัติทางกายภาพของเม็ดดูดซับทั้ง 2 อุณหภูมิ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของเม็ดดูดซับเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยเครื่อง Surface Area –Analyzer

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ค่าที่วัดได้	
	550 °C	850 °C
พื้นที่ผิว (m ² /g)	42.120	13.474
ปริมาตรรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 993.2654 Å (cm ³ /g)	0.096	0.048
ปริมาตรรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 17Å –3,000Å (cm ³ /g)	0.102	0.052
ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพที่แห้ง (cm ³ /g)	0.015	0.012
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (Å)	90.863	141.320

4.9 ผลการหาเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ

ทำการศึกษาลักษณะการดูดซับเพื่อหาระยะเวลาสัมผัส (contact time) ที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยพิจารณาจากการที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในสารละลายหลังจากถูกดูดซับครั้งที่ ทำการทดลองในระบบแบบกะ กำหนดปริมาณเม็ดดูดซับให้คงที่ ประมาณ 3 กรัม ให้ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เก็บสารละลายฟลูออไรด์หลังการดูดซับที่เวลา 30 60 120 180 240 300 และ 360 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์โดยวิธี SPADNS ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ที่เวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 พบว่า ช่วง 60 นาทีแรกกราฟจะมีความชันมาก แสดงถึงการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในระยะเวลาเริ่มต้นพื้นผิวของเม็ดดูดซับมีพื้นที่มาก ทำให้มีอัตราการดูดซับมีมากขึ้น [33] คือที่เวลา 30 นาที ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ 0.464 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา 60 นาที ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นเป็น 0.721 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงจุดสมดุล กล่าวคือบริเวณพื้นผิวของเม็ดดูดซับน้อยลง เนื่องจากถูกปกคลุมด้วยฟลูออไรด์ ส่งผลให้อัตราการดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง [33] ที่เวลา 240 นาที เป็นเวลาที่มีการดูดซับมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากอัตราการดูดซับกับอัตราการคายออกมีค่าเท่ากัน แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุล เม็ดดูดซับไม่ดูดซับฟลูออไรด์เพิ่มมากขึ้นอีกเมื่อเวลาผ่านไป [34] ที่เวลา 240 300 และ 360 นาที มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ 1.210 1.204 และ 1.210 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ดังนั้นในการทดลองหาไอโซเทอมของงานวิจัยนี้ จึงทำการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ในเครื่องเขย่าเป็นเวลา 240 นาที หรือ 4 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับ

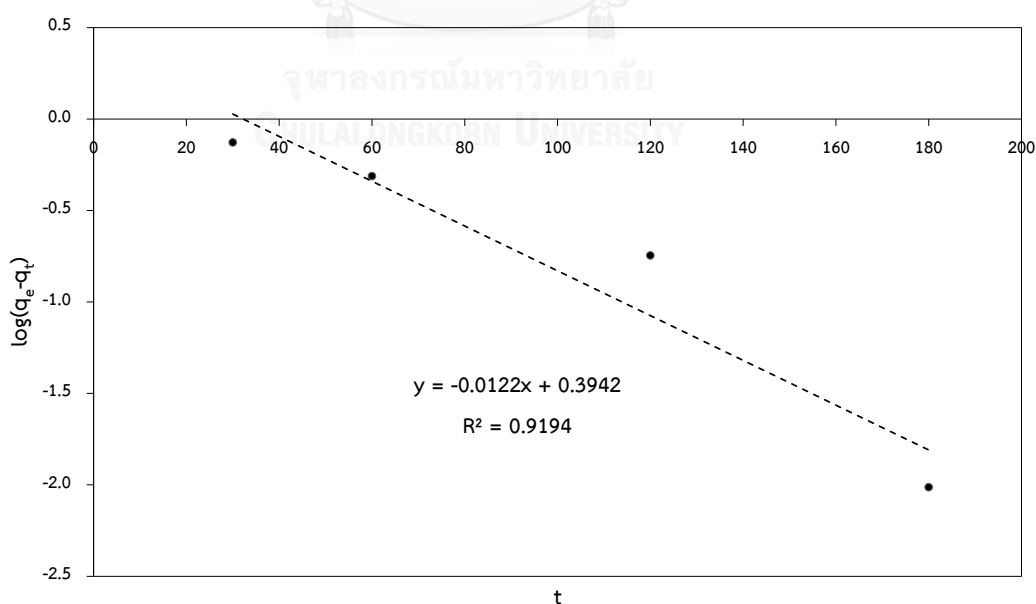
ถ้าพิจารณาในกรณีที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับฟลูออไรด์ที่สมดุลจะเร็วกว่า 240 นาที เช่น ถ้าความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสมดุลของการดูดซับคือ 25 นาที กล่าวคือยิ่งความเข้มข้นฟลูออไรด์น้อย เวลาสมดุลของการดูดซับก็จะน้อยลงตามไปด้วย

4.10 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic Modeling)

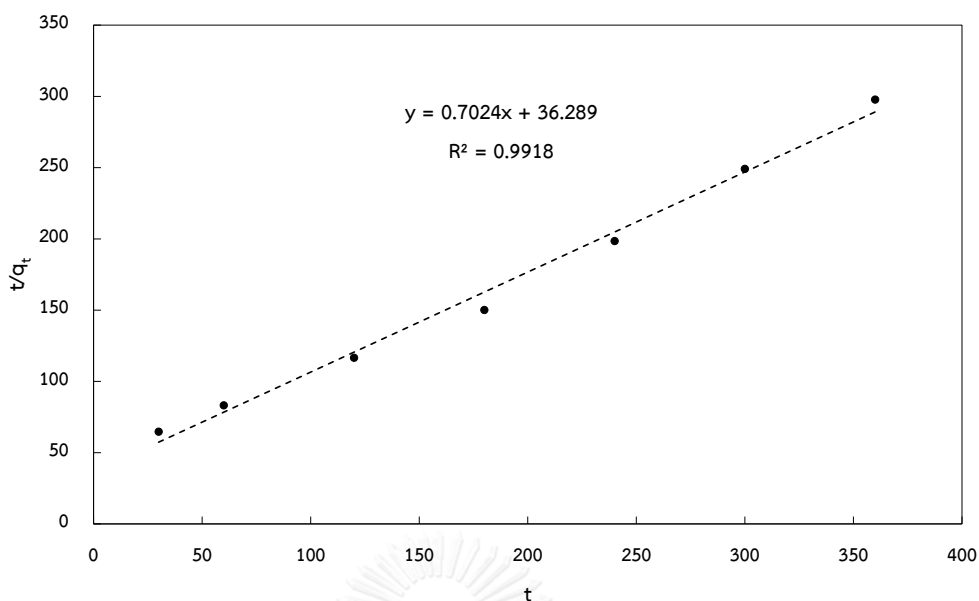
ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ โดยเปรียบเทียบกับสมการจลนพลศาสตร์ 2 สมการ คือ สมการแบบจำลองเทียมอันดับหนึ่งและสอง (Pseudo-First Order และ Pseudo-Second Order) เมื่อนำมาพล็อตกราฟเส้นตรงตามสมการ 4.8 และ 4.9 ได้กราฟดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4.8)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.18 แบบจำลองเทียมอันดับหนึ่ง



รูปที่ 4.19 แบบจำลองเทียบอันดับสอง

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t ดังรูปที่ 4.18 ได้สมการเส้นตรง $y = -0.0122x + 0.3942$ และเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t ดังรูปที่ 4.19 ได้สมการเส้นตรง $y = 0.7024x + 36.289$ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แบบจำลองเทียบอันดับสองมีค่าเท่ากับ 0.9918 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองเทียบอันดับหนึ่ง ($R^2 = 0.9194$) แสดงว่าการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองเทียบอันดับสองมากกว่า สันนิษฐานได้ว่าการดูดซับเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างไอออนในพื้นที่ผิวเม็ดดูดซับกับฟลูออไรด์ไอออน [32] โดยที่เวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับจะนานขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟลูออไรด์หรือลดปริมาณเม็ดดูดซับต่อปริมาตรสารละลายลง [35] สามารถคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ (q_e) และค่าคงที่แบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และอันดับที่สอง (k) ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับ

ค่าพารามิเตอร์	แบบจำลองเทียบอันดับหนึ่ง	แบบจำลองเทียบอันดับสอง
q_e (mg/g)	2.4786	1.4237
k (min^{-1})	0.0281	0.0136
R^2	0.9194	0.9918

4.11 ไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

ไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุล กับความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของเม็ดดูดซับฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิคงที่ ตามวิธีวิธีการจ้ยข้อ 3.4.10 โดยใช้ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 6 ความเข้มข้นคือ 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วใส่เม็ดดูดซับปริมาณคงที่ประมาณ 3 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิคงที่ ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ก่อนและหลังดูดซับด้วยเม็ดดูดซับจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

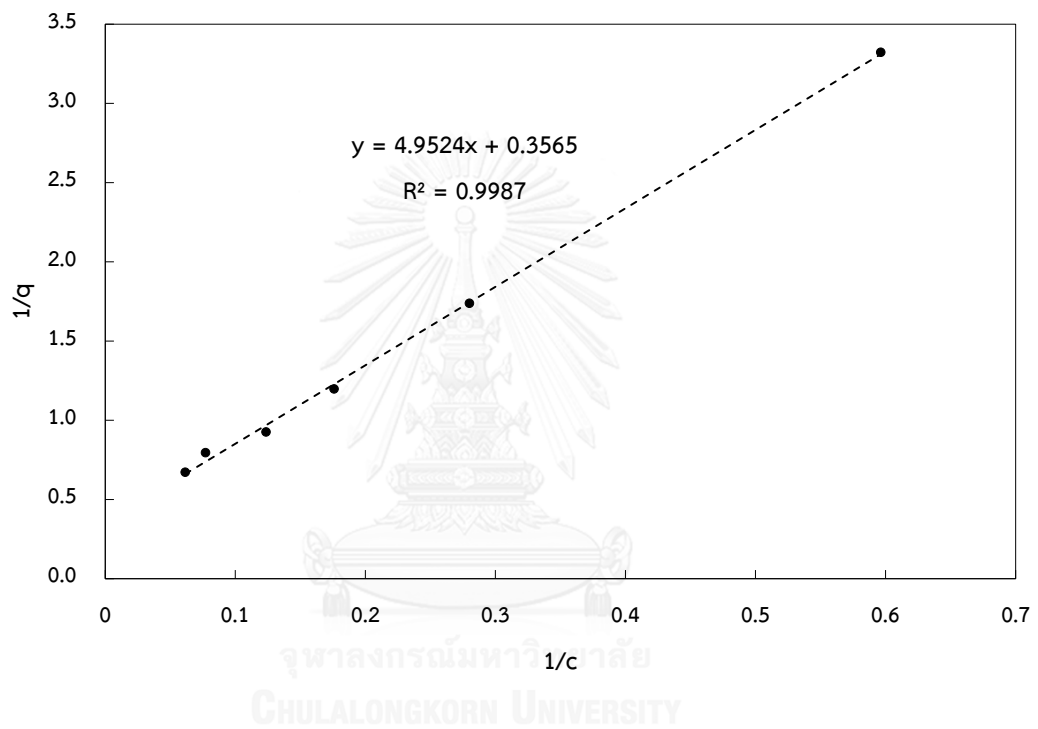
C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q (mg/L)	% Adsorption
10.7067	1.6768	0.3010	84.3392
20.8290	3.5701	0.5753	82.8598
30.7328	5.6820	0.8350	81.5117
40.4928	8.0851	1.0803	80.0332
50.6880	12.9642	1.2575	74.4235
60.8831	16.2412	1.4881	73.3239

จากข้อมูลตารางที่ 4.7 มาพล็อตกราฟ ตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ ตามสมการที่ 4.10 จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.20 ที่มีความชันเท่ากับ $1/bQ^0$ และจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ $1/Q^0$ และนำมาพล็อตกราฟตามสมการของฟรอนดิชไอโซเทอม ตามสมการที่ 4.11 จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.21 มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ $\log K$

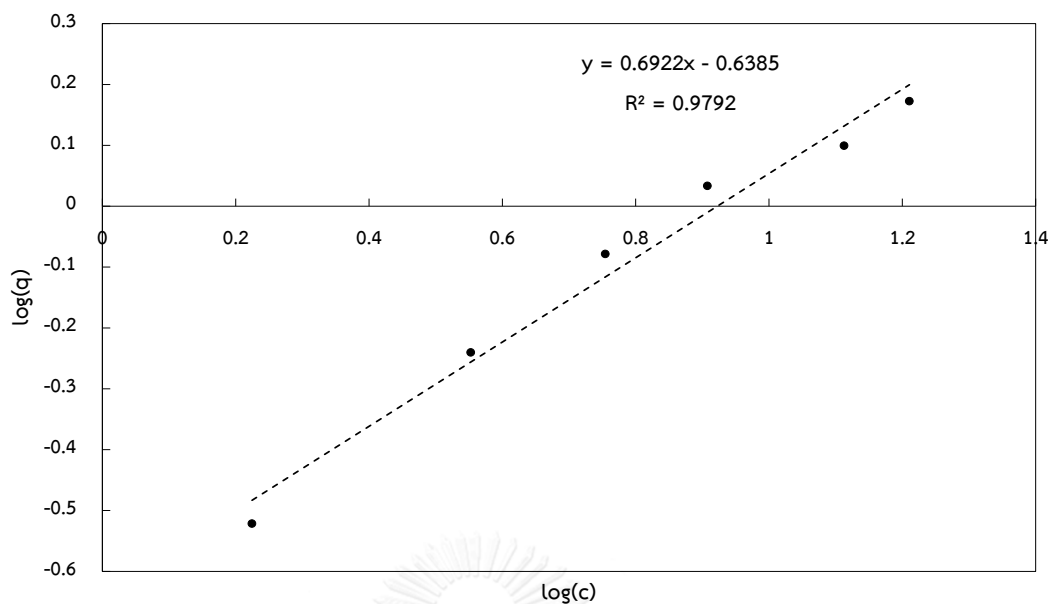
$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{Q^0 b} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{Q^0} \quad (4.10)$$

$$\log q = \log K + \left(\frac{1}{n} \right) \log C \quad (4.11)$$

- เมื่อ Q° คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียว
 ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- b คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ bonding strength หรือเป็นค่าคงที่ของ
 ความร้อนของการดูดซับ
- K คือ ค่าคงที่ฟรุนดิช
- n คือ Adsorption Intensity



รูปที่ 4.20 แล่งเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดูดซับ



รูปที่ 4.21 ฟรอนดิชไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดูดซับ

จากกราฟในรูปที่ 4.20 พบว่า สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ $y = 4.9524x + 0.3565$ $R^2 = 0.9987$ เมื่อแทนค่าลงในสมการแลงเมียร์ $1/q = (1/Q^0b)(1/c) + 1/Q^0$ สามารถหาค่า Q^0 ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ได้จากจุดตัดแกนในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.805 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่า b ได้จากความชันกราฟ เท่ากับ 0.072 ลิตรต่อกรัม ซึ่งค่า b มีค่าน้อย แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี [8] เมื่อนำค่า b ที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ของการแยกตัว (R_L) ตามสมการที่ 4.12 พบว่าค่า R_L อยู่ในช่วง 0 กับ 1 ดังนั้นจึงได้ว่าเม็ดดูดซับที่พัฒนาได้อยู่ในช่วงของการดูดซับที่ดี [6]

$$R_L = \frac{1}{1 + bc_i} \quad (4.12)$$

จากกราฟในรูปที่ 4.21 พบว่า สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิช คือ $y = 0.6922x - 0.6385$ $R^2 = 0.9792$ ตามลำดับ เมื่อแทนค่าลงในสมการฟรอนดิช คือ $\log q = \log K + (1/n) \log C$ สามารถหาค่าคงที่ฟรอนดิช (k) จากจุดตัดแกนในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.2299 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่า Adsorption Intensity (n) ได้จากความชันกราฟ เท่ากับ 1.4447 กรัมต่อลิตร สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับตามสมการแลงเมียร์ และฟรอนดิชไอโซเทอม ไว้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับตามสมการแลงเมียร์ และ ฟรุนดิชไอโซเทอม

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้	
แลงเมียร์ไอโซเทอม	Q° (mg/g)	2.8050
	b (L/g)	0.0720
	R^2	0.9987
ฟรุนดิชไอโซเทอม	K (mg/g)	0.2299
	n (g/L)	1.4447
	R^2	0.9792

เมื่อเปรียบเทียบค่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดิช พบว่า ค่า R^2 ของแลงเมียร์ไอโซเทอม มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่า การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับ สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอมมากกว่า ดังนั้นการดูดซับน่าจะเป็นไปตามข้อสมมุติฐาน ดังนี้ เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (mono layer) โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิวดูดซับ นั่นคือการดูดซับจะเกิดการเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) พลังงานของการดูดซับจะเท่ากันทุกบริเวณ นอกจากนี้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ และสามารถเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาได้ [8]

ค่า Q° มีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการดูดซับ คือถ้าค่า Q° มีค่ามาก ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูง [8] เมื่อนำค่า Q° จากงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับสารดูดซับที่มี ต้นทุนต่ำ และจากดินชนิดอื่น พบว่า ค่า Q° จากงานวิจัยนี้ต่ำกว่าค่า Q° จากการดูดซับฟลูออไรด์ของ Hydroxyapatite และ Ando soil แต่มีค่าสูงกว่าค่า Q° จากการดูดซับฟลูออไรด์ของดินตะกอนโรง กรองน้ำ Montmorillonite clay Fired clay และ Bentonite แสดงดังตารางที่ 4.9 ปัจจัยที่ทำให้ สารดูดซับแต่ละชนิดมีปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับโครงสร้าง สมบัติทางเคมี ของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวในการดูดซับของตัวดูดซับนั้น ๆ การที่ Hydroxyapatite มีความสามารถในการดูดซับมากกว่างานวิจัยนี้น่าจะเป็นสาเหตุจาก Hydroxyapatite เป็นแร่ที่มี โครงสร้างของ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับฟลูออไรด์ไอออนได้ดี ส่วน Ando soil เป็นดินที่ได้จากเถ้าภูเขาไฟในประเทศเคนยา จึงทำให้ดินมีลักษณะความพรุนค่อนข้างมาก และมีส่วนประกอบของอลูมิเนียม แคล็ก และซิลิกอน จึงทำให้สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ดี ในขณะที่

ตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้มีค่า Q° สูงกว่าดินตะกอนโรงกรองน้ำ Montmorillonite clay Fired clay และ Bentonite นั้นอาจเป็นเพราะงานวิจัยนี้มีการผสมดินโคละทอไมท์ ซึ่งเป็นดินที่มีความพรุนในเนื้อดินค่อนข้างสูง ทำให้เป็นสารดูดซับที่มีความพรุน หรือพื้นที่ผิวในการดูดซับฟลูออไรด์ได้มากกว่า

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยสารที่มีต้นทุนต่ำ

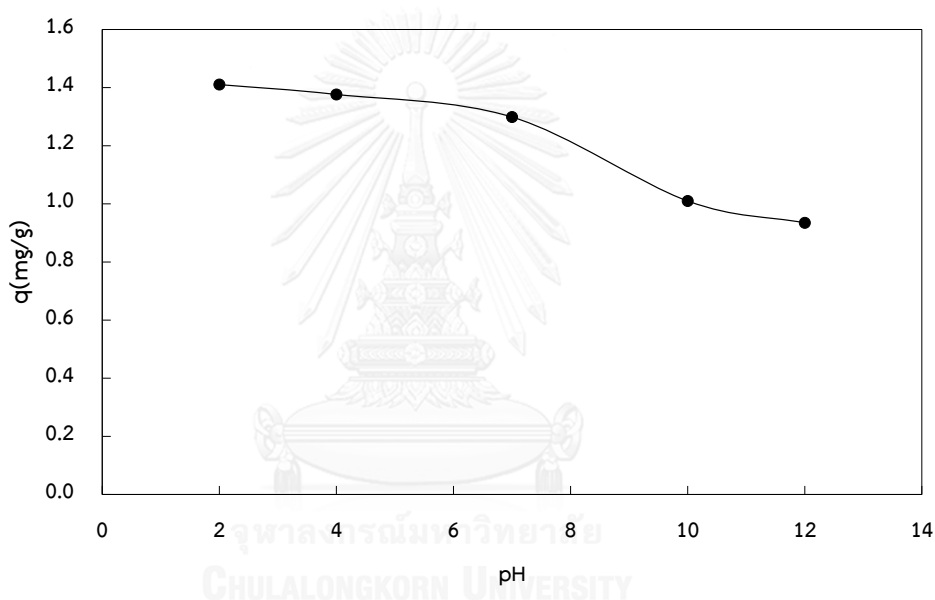
สารดูดซับ	แหล่งที่มา	Q° (mg/g)
Hydroxyapatite	Fan และคณะ 2003 [29]	4.54
Activated quartz	Fan และคณะ 2003 [29]	1.16
ดินตะกอนโรงกรองน้ำ	ศิวพร และคณะ 2546 [10]	2.14
Montmorillonite clay	Karthikeyan และคณะ 2005 [28]	1.48
Fired clay	Moges และคณะ 1996 [36]	0.20
Ando soil	Zevenbergen และคณะ 1996 [37]	5.51
Bentonite	Srimurali และคณะ 1998 [38]	1.15
ดินตะกอนผสมดินโคละทอไมท์	งานวิจัยนี้	2.81

หากพิจารณาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ช่วงความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นต่ำกว่านี้ การดูดซับฟลูออไรด์ก็น่าจะสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม เช่นกัน เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ และลักษณะการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับไม่ว่าจะความเข้มข้นมากหรือน้อยจะเกิดการดูดซับในลักษณะดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งในส่วนของแบบจำลองฟรันทิชไอโซเทอม มีสมมติฐานในการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด

ในกรณีใช้สารส้มในการบำบัดฟลูออไรด์ เป็นวิธีกำจัดฟลูออไรด์ในลักษณะการรวมตัวเป็นก้อน (Coagulation) โดย $Al(OH)_3$ จะรวมตัวกับฟลูออไรด์ตกตะกอนลงมา [7] จากงานวิจัยของคุณรุจิรา ได้มีการใช้สารส้มในการบำบัดน้ำ พบว่า เมื่อใช้สารส้มในการบำบัดจะทำให้ความขุ่น (Turbidity) ในน้ำลดลง และทำให้ปริมาณฟลูออไรด์ลดลงจากความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 0.52 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.42 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์เท่ากับ 0.005 มิลลิกรัมต่อกรัม ถือว่าสารส้มเป็นสารที่สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ แต่มีข้อจำกัดคือ สามารถลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ได้จนถึงเท่ากับค่าการละลายของตะกอนที่เกิดขึ้น [8]

4.12 ผลของพีเอชของสารละลายฟลูออไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ

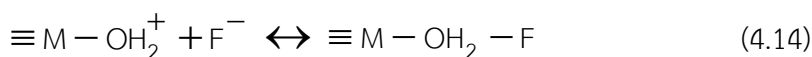
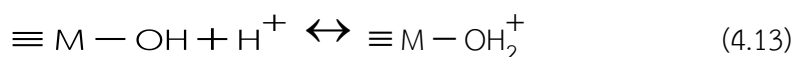
การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของพีเอชของสารละลายฟลูออไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับที่พัฒนาขึ้น ในสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 2 4 7 10 และ 12 ตามลำดับ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่เม็ดดูดซับประมาณ 3 กรัม แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 110 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์โดยวิธี SPADNS พบว่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ (q) เท่ากับ 1.410 1.376 1.299 1.001 และ 0.935 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณการดูดซับของเม็ดดูดซับที่พีเอช ต่างๆ

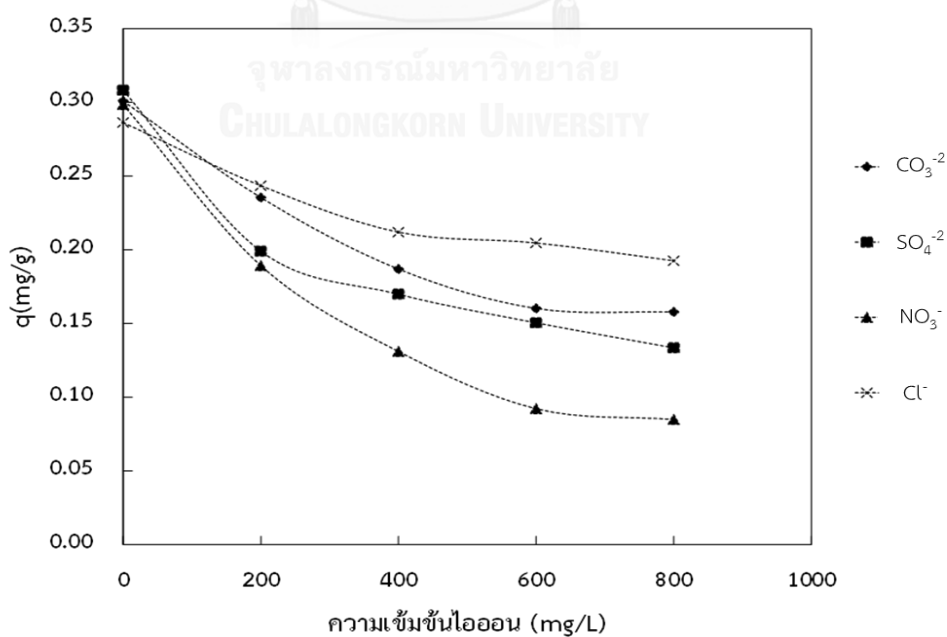
จากการทดลองพบว่าที่พีเอช 2 มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงที่สุด ส่วนที่พีเอช 12 มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ต่ำที่สุด ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย โดยค่าพีเอชจะมีผลต่อประจุบริเวณผิวหน้าของเม็ดดูดซับ โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอชของสารละลายลดลง เนื่องจากในสารละลายที่มีพีเอชต่ำจะมีไฮโดรเจนไอออน (H^+) อยู่เป็นจำนวนมาก และไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่เป็นจำนวนมากนั้นจะไปติดติดกับผิวหน้าของสารประกอบออกไซด์ เกิดโปรโตเนชัน (protonation) แสดงดังสมการที่ 4.13 และ 4.14 ทำให้เม็ดดูดซับสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อพีเอชของสารละลายสูงจะทำให้ในสารละลายมีจำนวนไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) อยู่ในสารละลายมาก ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนนั้น

มีความสามารถดูดซับกับเม็ดดูดซับได้ดีกว่าฟลูออไรด์ไอออน ทำให้ฟลูออไรด์ไอออนสามารถดูดซับบนพื้นที่ผิวเม็ดดูดซับได้น้อยลง [23, 28]



4.13 ศึกษาอิทธิพลของไอออนลบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ของเม็ดดูดซับ

โดยทั่วไปน้ำบาดาลก่อนที่จะผ่านกระบวนการมาเป็นน้ำเพื่อการบริโภค จะพบมีไอออนลบละลายอยู่ เพราะน้ำบาดาลมีโอกาสที่จะสัมผัสกับแร่ธาตุต่าง ๆ ในหินที่น้ำบาดาลกักเก็บอยู่ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ของเม็ดดูดซับได้ จึงทำการศึกษาผลของไอออนลบ ได้แก่ ไนเตรต (NO_3^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) คลอไรด์ (Cl^-) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ เมื่อใช้ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อมีไอออนลบความเข้มข้น 0 200 400 600 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบายการดูดซับฟลูออไรด์ตามวิธีการวิจัยข้อ 3.4.13 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ผลของไอออนลบต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ไอออนลบมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ โดยแต่ละไอออนมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ต่างกัน โดยที่ NO_3^- จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุด รองลงมาคือ SO_4^{2-} CO_3^{2-} และ Cl^- ตามลำดับ ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของ NO_3^- จาก 0 เพิ่มขึ้นเป็น 200 400 600 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะทำให้ปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงอย่างมาก คือจาก 0.299 ลดลงเหลือ 0.189 0.131 0.092 และ 0.085 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วน SO_4^{2-} และ CO_3^{2-} ทำให้ปริมาณการดูดซับลดลงในปริมาณใกล้เคียงกัน คือปริมาณการดูดซับลดลงจาก 0.308 ลดลงเหลือ 0.199 0.170 0.150 และ 0.134 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของ SO_4^{2-} เพิ่มขึ้น ส่วน CO_3^{2-} ทำให้ปริมาณการดูดซับลดลงจาก 0.301 ลดลงเหลือ 0.235 0.187 0.160 และ 0.158 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และ Cl^- มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงน้อยที่สุดคือ ปริมาณการดูดซับลดลงจาก 0.286 ลดลงเหลือ 0.244 0.212 0.205 และ 0.193 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

สาเหตุที่ทำให้ไอออนแต่ละตัวมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ต่างกันเนื่องจาก ไอออนแต่ละตัวถูกน้ำไฮเดรตได้ไม่เท่ากัน โดยไอออนที่ถูกโมเลกุลของน้ำเข้าไปไฮเดรตได้น้อยกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเม็ดดูดซับได้ดีกว่า ซึ่งตามตารางธาตุแล้วไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะถูกไฮเดรตได้น้อยกว่า นั่นคือสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับเม็ดดูดซับได้ดีกว่า [39] เมื่อเปรียบเทียบมวลโมเลกุลของไอออนลบที่ทำการศึกษามีมวลโมเลกุลเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^-$ และพิจารณาร่วมกับขนาดไอออน โดยที่ไอออนมีขนาดเล็กจะสามารถเข้าไปภายในรูพรุนได้ง่ายกว่า ไอออนขนาดใหญ่ [8] ซึ่งพบว่า NO_3^- มีขนาดเล็กกว่า SO_4^{2-}

จากการทดลองพบว่า ไนเตรตไอออนมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับลดลงมาก ดังนั้นในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลที่มีปริมาณฟลูออไรด์ปริมาณเกินมาตรฐานมาก ๆ จำเป็นต้องทำการกำจัดไนเตรตไอออนออกก่อน เพื่อให้เม็ดดูดซับดูดซับฟลูออไรด์ได้เต็มประสิทธิภาพที่สุด และเพื่อให้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในน้ำอยู่ในระดับที่ปลอดภัย

นอกจากพบไอออนลบในน้ำบาดาลแล้ว อาจพบไอออนบวกปะปนอยู่ในน้ำบาดาลได้เช่นกัน ซึ่งจากงานวิจัยของคุณรุจิรา ทำการบำบัดฟลูออไรด์ด้วยดินเบนโทไนต์ [8] และงานวิจัยของคุณศิวพร ทำเม็ดดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนโรงกรองน้ำ [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของไอออนบวก ได้แก่ Na^+ และ Ca^{2+} ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า ทั้ง Na^+ และ Ca^{2+} ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำเม็ดดูดซับฟลูออไรด์จากดินตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำดื่มร่วมกับดินโคอะทอไมท์ และเกิดกลไกการดูดซับฟลูออไรด์ในลักษณะที่คล้ายกับงานวิจัยข้างต้น ไอออนบวกจึงไม่น่ามีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์เช่นกัน เนื่องจากไอออนบวกไม่ไปทำการแย่งการดูดซับบริเวณพื้นที่ผิวเม็ดดูดซับที่มีการดูดซับฟลูออไรด์ไอออน ในทางตรงข้ามอาจทำให้ฟลูออไรด์ลดลงได้เนื่องจากการตกตะกอนของโซเดียมและแคลเซียมฟลูออไรด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอช

และความเข้มข้นของไอออนในน้ำด้วยว่าจะตกตะกอนได้หรือไม่ และตกตะกอนในรูปสารประกอบใด
กรณีของแคลเซียมอาจอยู่ในรูป CaF_2 ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนโมลของแคลเซียมต่อฟลูออไรด์ และค่า
ความเป็นกรดต่างของสารละลาย เป็นต้น [8]

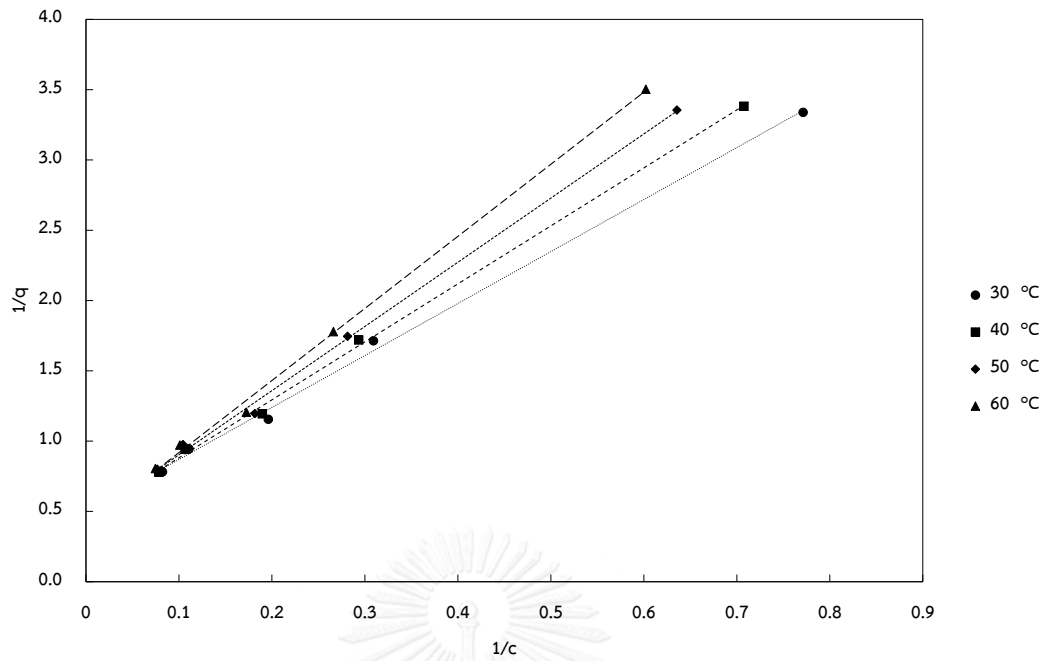
4.14 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับที่สภาวะอุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ที่ 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณเม็ดดูดซับประมาณ 3 กรัม เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟตามความสัมพันธ์ แลงเมียร์ไอโซเทอม ระหว่าง $1/q$ กับ $1/c$ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ $1/Q^b$ นำค่า b เปลี่ยนค่าเป็น K_L นำไปแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ Arrhenius plot สมการที่ 4.15 พล็อตระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ $-\Delta H^\circ/R$ และจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ $\Delta S^\circ/R$ โดยที่ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ จูล}\cdot\text{โมล}^{-1}\cdot\text{เคลวิน}^{-1}$ และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์จากสมการ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ดังตารางที่ 4.10 [40]

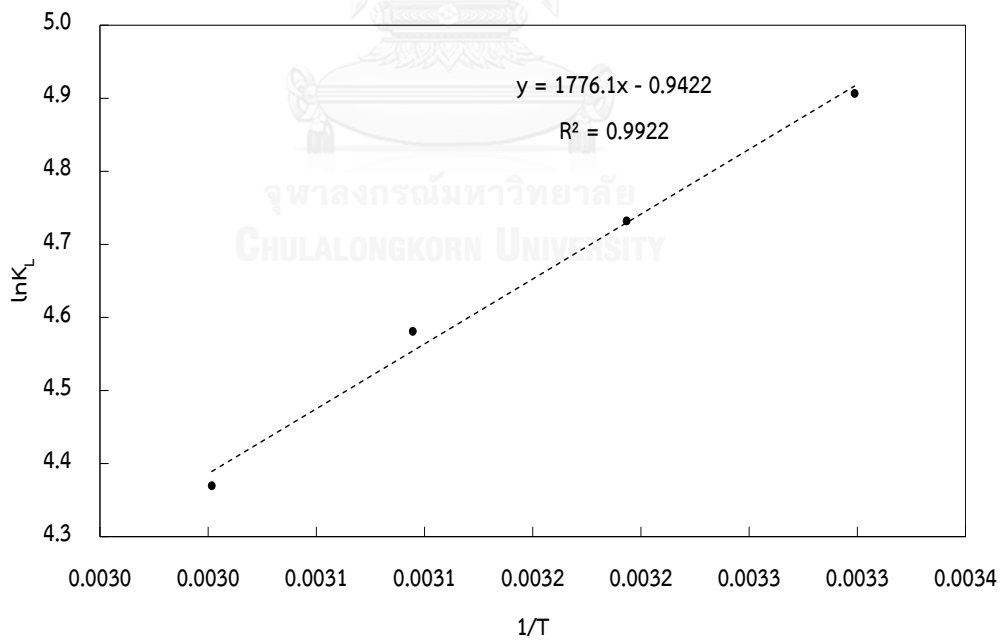
$$\ln K_L = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (4.15)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L \quad (4.16)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.24 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ Arrhenius plot

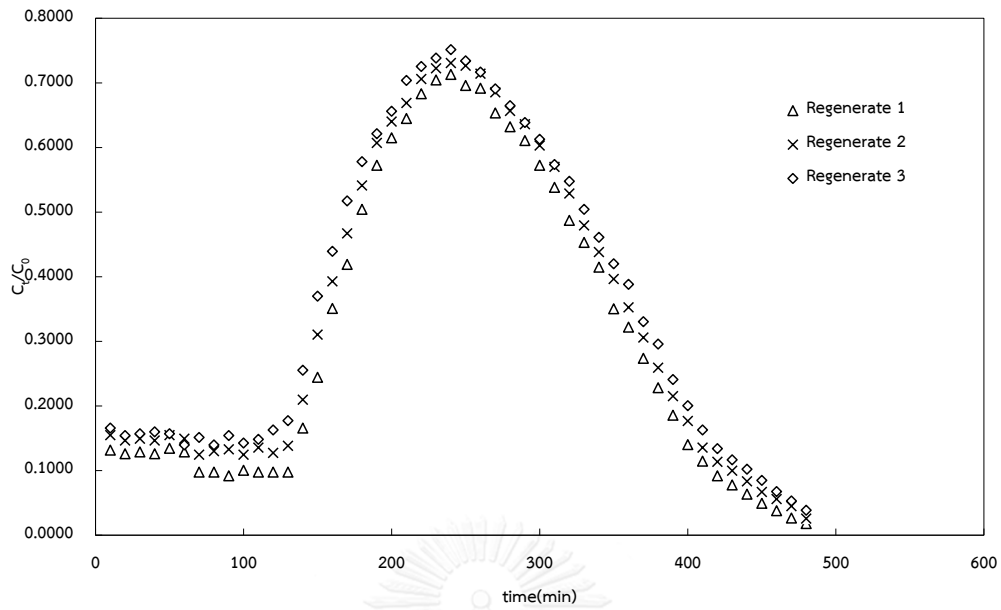
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี

อุณหภูมิ (°C)	K_L (L/mg)	ΔG° (kJ/mol)	ΔS° (J/molK)	ΔH° (kJ/mol)
30	135.1761	-12.3665	-7.8335	-14.7665
40	113.5488	-12.3205		
50	97.6138	-12.3077		
60	79.0172	-12.1031		

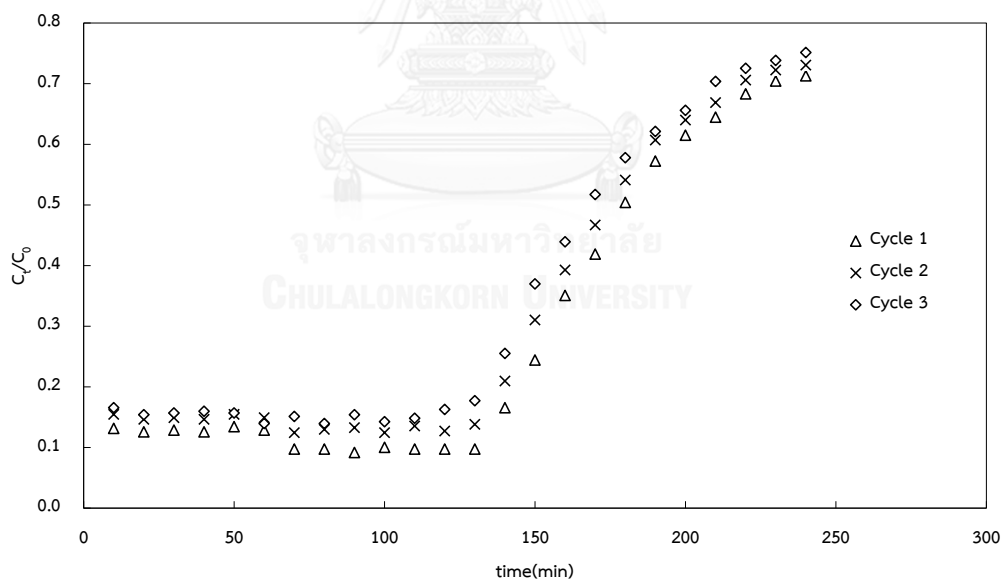
เมื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ พลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) มีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิการดูดซับที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ -12.37 -12.32 -12.31 และ -12.10 กิโลจูลต่อโมล ที่อุณหภูมิการดูดซับ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าระบบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ (spontaneous process) และความสามารถในการเกิดขึ้นเองได้ (spontaneity) ของระบบการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ค่ามาตรฐานการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH°) เท่ากับ -14.77 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่าระบบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน สามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก [19] แสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์มากนัก และมีค่าน้อยกว่า 50 กิโลจูลต่อโมล จัดว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ [41] ส่วนค่ามาตรฐานการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) มีค่าเท่ากับ -7.83 จูลต่อโมลเคลวิน ซึ่งเป็นค่าลบ ทำให้ทราบว่าระบบการดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบลดลง เนื่องจากการดูดซับทำให้โมเลกุลของฟลูออไรด์ลดความไม่เป็นระเบียบลงเพื่อยึดเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ จึงทำให้ค่ามาตรฐานเอนโทรปีของระบบมีค่าเป็นลบ [19]

4.15 การฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ (Regenerate)

ทำการศึกษากการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับในท่ออะคลิคล์เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร ความสูงของเม็ดดูดซับ 5 เซนติเมตร พบว่า ใส่เม็ดดูดซับได้ปริมาณ 5.254 กรัม ใช้ฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ทำซ้ำ 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งทำการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.001 โมลาร์ ที่อัตราการไหลเดียวกับสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นล้างน้ำปราศจากไอออนเพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค้างอยู่ให้หมดไป จนค่าความเป็นกรดต่างคงที่ ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ 3 ครั้ง แสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงการดูดซับและการฟื้นฟูของเม็ดดูดซับ 3 ครั้ง

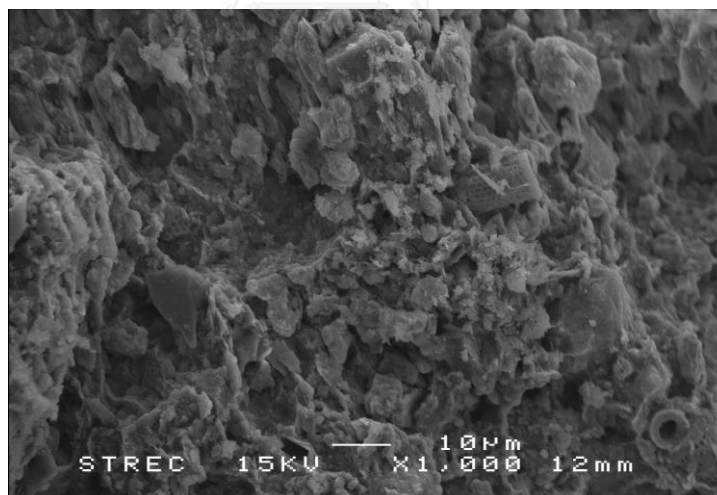


รูปที่ 4.27 แสดงการดูดซับของเม็ดดูดซับ 3 ครั้ง

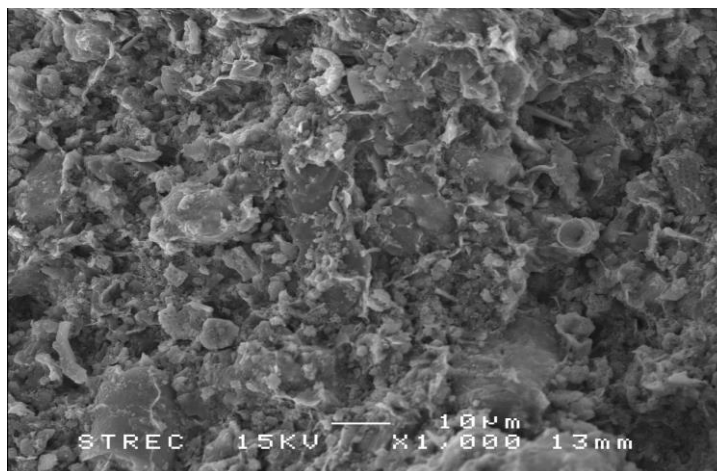
การดูดซับในรอบแรก พบว่า ในช่วงเวลา 10-130 นาที ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ จะอยู่ในช่วง 86-90 % จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา 240 นาที การดูดซับฟลูออไรด์ สามารถดูดซับได้เพียง 26% เท่านั้น โดยเม็ดดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของ เม็ดดูดซับชั้นถัดมาจะหมดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา [14] จากการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ พบว่า ความสามารถในการดูดซับลดลงประมาณ 2 % ในแต่ละครั้ง ซึ่งความสามารถในการดูดซับ ฟลูออไรด์ลดลงแต่ละครั้ง เนื่องจากไม่สามารถนำฟลูออไรด์ที่เกาะในเม็ดดูดซับออกจนหมดได้ จึงทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับฟลูออไรด์ลดน้อยลง

4.16 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคของเม็ดดูดซับโดย Scanning Electron Microscopy (SEM)

เมื่อนำเม็ดดูดซับที่ขึ้นรูปก่อนดูดซับ และเม็ดดูดซับที่นำไปดูดซับฟลูออไรด์แล้วด้านตัดขวาง มาส่องด้วยเครื่อง SEM พบว่า ลักษณะเม็ดดูดซับก่อนดูดซับมีตาข่ายรูปทรงกระบอกซึ่งเป็น ส่วนประกอบของดินไคอะทอไมท์กระจายอยู่ในโครงสร้างของดินตะกอน ส่วนลักษณะเม็ดดูดซับหลัง ดูดซับฟลูออไรด์จะมีความเป็นรูพรุนและความเป็นเหลี่ยมมุมลดลง แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM ของเม็ดดูดซับฟลูออไรด์ก่อนดูดซับฟลูออไรด์กำลังขยาย x1,000



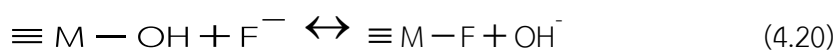
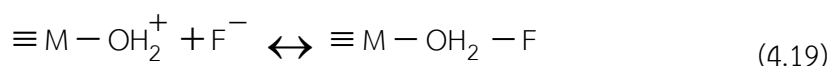
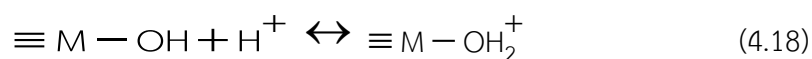
รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของเม็ดดูดซับฟลูออไรด์หลังดูดซับฟลูออไรด์กำลังขยาย x1,000

เมื่อนำเม็ดดูดซับมาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง XRF พบว่า ปริมาณ SiO_2 Fe_2O_3 CaO K_2O TiO_2 MnO P_2O_5 และ BaO มีปริมาณลดลงหลังจากดูดซับฟลูออไรด์ แสดงดังในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบในเม็ดดูดซับจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF

สารดูดซับ	ความเข้มข้น (%wt)										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	TiO_2	MnO	Na_2O	P_2O_5	BaO
เม็ดดูดซับ ก่อนดูดซับ	56.1	14.8	13.3	5.29	1.21	0.829	0.558	0.466	0.350	0.220	0.115
เม็ดดูดซับ หลังดูดซับ	53.6	15.7	12.2	4.68	1.17	0.863	0.542	0.436	0.368	0.197	0.096

ปริมาณ SiO_2 Fe_2O_3 ที่ลดลงนั้นอาจจะแตกตัวไปจับกับ F^- แสดงดังสมการที่ 4.18 4.19 หรือ 4.20 ตามลำดับ



เมื่อ M เป็น metal ion (Si Fe หรือ Al)

4.17 คุณภาพน้ำหลังผ่านเมื่อดูดซับ

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลตัวอย่าง จากโรงงานน้ำดื่ม หจก. โอซ์ แอนด์ เพียววอเตอร์ จังหวัดเชียงราย และน้ำหลังผ่านการดูดซับฟลูออไรด์ ในระบบแบบกะเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เทียบกับค่ามาตรฐานน้ำดื่ม ได้ผลดังตารางที่ 4.12 พบว่า ในน้ำตัวอย่างก่อนทำการดูดซับ ค่า Turbidity ปริมาณธาตุ Iron (Fe) และ Fluoride (F) เกินค่ามาตรฐานน้ำดื่ม และเมื่อนำน้ำบาดาลที่ผ่านการดูดซับจากเมื่อดูดซับไปตรวจคุณภาพน้ำ พบว่า ค่า Total Dissolved Solids (TDS) Total Hardness และ Calcium (Ca) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าที่เพิ่มขึ้นไม่เกินคุณภาพมาตรฐานน้ำดื่ม แสดงให้เห็นว่า มีเศษเมื่อดูดซับหลุดออกบางส่วนปะปนกับน้ำบาดาล แต่เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ลักษณะเมื่อดูดซับยังคงรูปอยู่ และถือว่ามีควมคงรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้ ในขณะที่ปริมาณธาตุ Iron (Fe) และ Magnesium (Mg) มีปริมาณลดลงเล็กน้อย ส่วนปริมาณฟลูออไรด์ (F) ลดลงจาก 3.87 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.46 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 88.21% ของการดูดซับฟลูออไรด์ หรือ 0.114 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4.12 ตารางคุณภาพน้ำบาดาลและน้ำบาดาลที่ผ่านการดูดซับจากเมื่อดูดซับ

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลวิเคราะห์		
		มาตรฐาน	น้ำบาดาล	ผ่านเมื่อดูดซับ
pH	-	7-8.5	7.8	8
Turbidity	NTU	5	20.5±2.98	9.5±1.67
Total Dissolved Solids(TDS)	mg/L	600	35.7±4.05	50.1±3.9
Total Hardness	mg/L as CaCO ₃	300	31.3±3.11	46.5±2.8
Iron (Fe)	mg/L	0.5	3.66±1.5	2.1±1.3
Calcium (Ca)	mg/L	75	7.35±3.0	9.3±2.5
Magnesium(Mg)	mg/L	50	2.31±2.9	2.17±3.8
Fluoride (F)	mg/L	0.7	3.87±3.7	0.46±3.4

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาองค์ประกอบในดินตะกอนจากโรงงานน้ำดื่ม และดินไคอะทอไมท์ พบว่ามี SiO_2 Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ดินที่มีส่วนประกอบของธาตุดังกล่าวสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ และจากการดูลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคดินตะกอน และดินไคอะทอไมท์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า เนื้อดินมีความพรุน จึงเป็นไปตามข้อสันนิษฐานว่าดินตะกอนและดินไคอะทอไมท์สามารถนำมาดูดซับฟลูออไรด์ได้

เมื่อนำดินตะกอนจากโรงงานมาผสมกับดินไคอะทอไมท์ในสัดส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใส่ลงในสารละลายฟลูออไรด์ พบว่าเม็ดดูดซับแตกออกเป็น 2 ซีก จึงนำเม็ดดูดซับที่ขึ้นรูปเป็นเม็ดดูดซับไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส นำไปดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า เม็ดดูดซับฟลูออไรด์ได้ไม่ดีขึ้น เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พื้นที่ผิวของเม็ดดูดซับลดลง ดังนั้นจึงทำการใส่ดินเหนียวเป็นดินประสานให้สามารถเม็ดดูดซับไม่แตก เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และพบว่าสัดส่วนที่ทำให้เม็ดดูดซับมีประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุด คือ ดินไคอะทอไมท์ต่อดินตะกอนต่อดินเหนียวเท่ากับ 1 ต่อ 1 ต่อ 0.5

ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับของเม็ดดูดซับ โดยใช้เม็ดดูดซับปริมาณ 3 กรัม ต่อสารละลายฟลูออไรด์ 100 มิลลิลิตร ในช่วงความเข้มข้น 10-60 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำในระบบแบบกะเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า การดูดซับของเม็ดดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ ไอโซเทอมมากกว่า ได้ค่าปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (Q°) และค่า b เท่ากับ 2.8050 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.072 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนการศึกษาแบบจำลองจลพลศาสตร์ พบว่า การดูดซับด้วยเม็ดดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองเทียมอันดับสอง แสดงว่าอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นกับพื้นที่ผิวของเม็ดดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟลูออไรด์ และการศึกษาหาค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ในช่วงอุณหภูมิ 20-60 องศาเซลเซียส พบว่า การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

อิทธิพลที่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์น้อยลงคือ สภาวะที่สารละลายเป็นเบสและสภาวะที่มีปริมาณของไอออนลบในสารละลาย โดยไอออนลบมีผลต่อการดูดซับแตกต่างกัน คือ ไอออนไนเตรตจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุด รองลงมาคือ ซัลเฟต คาร์บอเนต และคลอไรด์ ตามลำดับ

จากการศึกษานำเม็ดดูดซับมาใช้ซ้ำ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ในการนำเม็ดดูดซับมาใช้ใหม่ พบว่า สามารถนำเม็ดดูดซับนำกลับมาดูดซับฟลูออไรด์อีกครั้งจะทำให้ ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงครั้งละประมาณ 2%

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเม็ดดูดซับ พบว่า เม็ดดูดซับที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 42.120 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 90.863 อังสตรอม ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของไอออนฟลูออไรด์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 0.0266 อังสตรอม จึงเป็นไปได้ตามข้อสันนิษฐานที่ไอออนฟลูออไรด์จะสามารถเข้าไปจับกับ พื้นที่ผิวภายในรูพรุนของเม็ดดูดซับได้

เมื่อนำเม็ดดูดซับที่ผลิตขึ้นได้มาบำบัดน้ำบาดาลที่ทางโรงงานผลิตน้ำดื่มที่เชียงรายชุดเจาะ ขึ้นมาโดยทำในระบบแบบกะ พบว่า ปริมาณฟลูออไรด์ลดลงจาก 3.87 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.46 คิดเป็น 88.21% ของการดูดซับฟลูออไรด์แต่ พบว่า ปริมาณ Total Dissolved Solids (TDS) Total Hardness และ Calcium (Ca) มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากเม็ดดูดซับบางเม็ดเกิดการแตกออกเป็นชิ้น เล็ก ๆ ปะปนกับน้ำบาดาล ทำให้สารละลายมีความขุ่นมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการบำบัดฟลูออไรด์ด้วยเม็ดดูดซับ อิทธิพลของไอออนลบมีผลต่อประสิทธิภาพ การดูดซับ ดังนั้นอาจต้องกำจัดไอออนลบออกจากสารละลายก่อนนำไปดูดซับด้วยเม็ดดูดซับ เพื่อให้ ได้ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

5.2.2 ควรมีการศึกษารีชีวนรูปที่ทำให้เม็ดดูดซับสามารถขึ้นรูปได้แข็งแรง และมีพื้นที่ผิวมากขึ้น



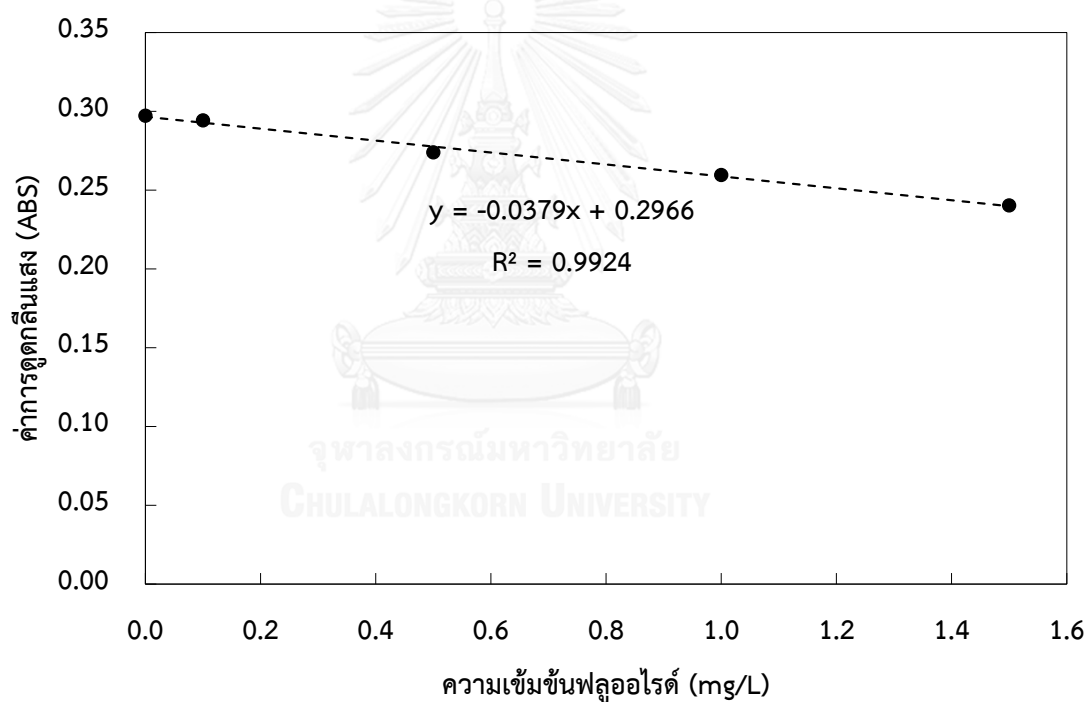
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์

แสดงกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์ที่ได้จากการทดลอง

เมื่อสร้างกราฟมาตรฐานตามวิธีเปียบิวรีวิธีวิจัยข้อ 3.4.5 ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์ (แกน X) กับค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y) จะได้กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์ (Calibration Curve) ดังรูป ก.1 ได้สมการเส้นตรงคือ $Y = -0.0379X + 0.2966$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9924 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ว่ามีความถูกต้องและแม่นยำสูงเนื่องจากมีค่า ใกล้เคียง 1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นฟลูออไรด์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลความเข้มข้นฟลูออไรด์ก่อนและหลังจากการทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข.1 แสดงความเข้มข้นฟลูออไรด์จากการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการดูดซับฟลูออไรด์

ส่วนผสม	ความเข้มข้นฟลูออไรด์ (mg/l)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ความเข้มข้นฟลูออไรด์ก่อนดูดซับ	50.834	51.271	50.397
ดินไดอะทอมไมท์	28.987	26.365	25.055
ดินตะกอน	26.365	27.676	24.181
ไดอะทอมไมท์:ดินตะกอน = 4:1	27.676	30.298	26.802
ไดอะทอมไมท์:ดินตะกอน = 1:4	32.919	30.298	28.987
ไดอะทอมไมท์:ดินตะกอน = 3:2	27.676	29.424	32.045
ไดอะทอมไมท์:ดินตะกอน = 2:3	26.802	29.861	26.802
ไดอะทอมไมท์:ดินตะกอน = 1:1	17.190	14.568	14.131

ตารางที่ ข.2 แสดงความเข้มข้นฟลูออไรด์จากการทดลองหาเวลาสมดุลในการดูดซับฟลูออไรด์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นฟลูออไรด์ (mg/l)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	50.834	51.271	50.397
30	35.029	38.306	37.432
60	27.383	30.660	29.568
120	18.426	21.047	20.392
180	13.183	16.241	15.149
240	13.183	16.241	14.275
300	13.401	16.460	14.275
360	13.183	16.460	14.057

ตารางที่ ข.3 แสดงความเข้มข้นฟลูออไรด์จากการทดลองการศึกษาอิทธิพลของพีเอชของสารละลายฟลูออไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์โดยเม็ดดูดซับ

อิทธิพลของ pH	ความเข้มข้นฟลูออไรด์ก่อนดูดซับ (mg/l)			ความเข้มข้นฟลูออไรด์หลังดูดซับ (mg/l)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
pH 2	50.397	51.271	50.834	6.410	9.032	10.124
pH 4	49.960	51.707	50.397	6.847	10.561	10.780
pH 7	50.834	50.834	51.707	9.687	13.183	13.620
pH 10	50.834	51.707	50.397	17.989	21.921	22.140
pH 12	50.834	50.397	51.271	20.174	22.795	25.417



ตารางที่ ข.4 แสดงความเข้มข้นฟลูออไรด์จากการทดลองการศึกษาอิทธิพลของไอออนลบที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์

อิทธิพลของ ไอออน	ความเข้มข้นฟลูออไรด์ก่อนดูดซับ (mg/l)			ความเข้มข้นฟลูออไรด์หลังดูดซับ (mg/l)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
CO ₃ ²⁻	10.561	10.343	11.216	1.604	1.822	1.604
	11.435	10.124	10.343	3.352	3.570	3.789
	10.780	10.998	10.561	5.099	5.536	4.881
	10.343	10.561	10.124	5.318	6.192	5.099
	11.216	10.780	10.343	5.973	6.629	5.536
SO ₄ ²⁻	11.216	10.343	10.780	1.822	1.167	1.604
	10.343	9.906	10.561	4.226	4.662	4.007
	10.561	10.998	10.998	5.536	5.973	5.755
	10.780	10.343	10.343	5.973	6.192	5.755
	10.998	10.561	10.124	6.410	6.847	6.410
NO ₃ ⁻	10.780	10.124	11.216	2.041	1.385	1.822
	10.998	10.343	10.998	4.519	4.956	5.829
	10.561	10.780	10.561	6.266	6.703	7.140
	10.343	9.906	10.780	7.140	7.140	8.451
	11.216	10.561	10.343	8.014	8.014	8.451
Cl ⁻	10.998	10.780	10.343	2.696	1.822	1.822
	10.561	10.124	10.998	3.352	3.645	2.771
	10.780	10.998	10.780	3.570	5.393	4.519
	11.435	10.998	10.343	4.007	5.829	4.519
	10.343	11.435	10.561	3.789	6.266	4.956

ตารางที่ ข.5 แสดงความเข้มข้นฟลูออไรด์จากการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลของ อุณหภูมิ	ความเข้มข้นฟลูออไรด์ก่อนดูดซับ (mg/l)			ความเข้มข้นฟลูออไรด์หลังดูดซับ (mg/l)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
30	10.341	10.341	10.167	0.889	1.195	1.806
	20.683	20.683	20.858	2.564	3.088	4.050
	31.267	30.976	30.976	4.137	5.011	6.147
	41.221	40.347	40.784	8.332	8.856	9.905
	51.271	50.397	49.960	11.390	11.914	13.138
40	10.429	10.167	10.254	1.064	1.282	1.894
	20.858	21.033	20.683	2.739	3.263	4.224
	30.102	30.685	30.394	4.224	5.273	6.322
	41.221	41.658	40.784	8.594	9.380	10.167
	50.834	51.707	51.271	11.652	12.788	13.837
50	10.167	10.953	10.429	1.151	1.501	2.069
	20.508	20.683	21.033	2.826	3.351	4.487
	30.976	30.685	30.102	4.661	5.448	6.409
	40.347	40.347	40.347	8.681	9.642	10.429
	50.834	50.397	50.397	12.002	13.050	14.099
60	10.254	10.079	10.341	1.326	1.544	2.112
	20.858	20.333	20.683	3.088	3.525	4.661
	30.685	30.394	30.976	4.836	5.623	6.933
	40.784	40.347	41.221	9.031	9.905	10.778
	50.397	50.834	50.834	12.177	13.837	14.187

ตารางที่ ข.6 แสดงความเข้มข้นฟลูออไรด์จากการทดลองการการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับ (Regenerate)

เวลา (นาที)	C _t /C		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10	0.1316	0.1548	0.1657
20	0.1260	0.1465	0.1542
30	0.1288	0.1493	0.1570
40	0.1260	0.1465	0.1599
50	0.1345	0.1548	0.1570
60	0.1288	0.1493	0.1397
70	0.0976	0.1246	0.1513
80	0.0976	0.1301	0.1397
90	0.0919	0.1328	0.1542
100	0.1004	0.1246	0.1426
110	0.0976	0.1355	0.1484
120	0.0976	0.1273	0.1628
130	0.0976	0.1383	0.1773
140	0.1657	0.2097	0.2553
150	0.2443	0.3105	0.3700
160	0.3509	0.3929	0.4393
170	0.4190	0.4670	0.5173
180	0.5043	0.5412	0.5780
190	0.5724	0.6071	0.6214
200	0.6150	0.6401	0.6561
210	0.6449	0.6689	0.7037
220	0.6832	0.7060	0.7254
230	0.7045	0.7225	0.7384

เวลา (นาที)	C _r /C		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
240	0.7131	0.7308	0.7514
250	0.6960	0.7266	0.7341
260	0.6917	0.7143	0.7167
270	0.6534	0.6854	0.6907
280	0.6321	0.6566	0.6647
290	0.6108	0.6360	0.6387
300	0.5724	0.6030	0.6127
310	0.5383	0.5701	0.5737
320	0.4872	0.5288	0.5477
330	0.4531	0.4794	0.5043
340	0.4148	0.4382	0.4610
350	0.3504	0.3965	0.4200
360	0.3220	0.3526	0.3882
370	0.2737	0.3059	0.3304
380	0.2282	0.2592	0.2958
390	0.1856	0.2152	0.2409
400	0.1402	0.1768	0.2004
410	0.1146	0.1355	0.1628
420	0.0919	0.1136	0.1339
430	0.0777	0.0998	0.1166
440	0.0635	0.0834	0.1021
450	0.0493	0.0669	0.0848
460	0.0379	0.0559	0.0675
470	0.0265	0.0449	0.0530
480	0.0180	0.0257	0.0386

รายการอ้างอิง

- [1] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. โครงการศึกษาประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล. [อินเทอร์เน็ต]. 2555. [เข้าถึงเมื่อ 5 พ.ย. 2557]. เข้าถึงได้จาก: http://www.dgr.go.th/project_kpn/file/2553/pdf5303.1.pdf.
- [2] ดารณี หมู่ขจรพันธ์. ความสำคัญของฟลูออไรด์ในน้ำบริโภคและอาหาร. [อินเทอร์เน็ต]. 2552. [เข้าถึงเมื่อ 5 พ.ย. 2557]. เข้าถึงได้จาก: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FO146_p93-95.pdf.
- [3] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลทั่วประเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2547-2554. [อินเทอร์เน็ต]. 2555: [เข้าถึงเมื่อ 5 พ.ย. 2557]. เข้าถึงได้จาก: <http://dc349.4shared.com/doc/dkECKyj1/preview.html>.
- [4] Liu Xiaojing, Wang Binbin, and Zheng Baoshan. Geochemical process of fluorine in soil. Chin.J.Geochem 33 (2014): 277-279.
- [5] พัชรภรณ์ สมทรง. การพัฒนาตัวกรองเซรามิกผสมเซรามิกผสมไดอะทอมไมต์ในการดูดซับโลหะหนัก. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2552.
- [6] อุดุลย์ ศรีพิลา. การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการดูดซับฟลูออไรด์บนถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูก. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, วิชาการสอนเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- [7] สุรศักดิ์ มานะรัตน์สุวรรณ. การกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและจากน้ำธรรมชาติ. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.
- [8] รุจิรา ไทยเอียด. ศึกษาและออกแบบระบบบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินแบบทีละเทโดยวิธีการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, เคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [9] อภิวรรณ เสาวเวียง. ฟลูออไรด์ภัยเงียบในน้ำดื่ม น้ำใช้. [อินเทอร์เน็ต]. 2557. [เข้าถึงเมื่อ 5 พ.ย. 2557]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.dailynews.co.th/article/282426>.

- [10] ศิวพร โคปาละสุต. การพัฒนาเม็ดดูดซับฟลูออไรด์จากตะกอนโรงกรองน้ำ
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, เคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2546.
- [11] ณัฐ ดิลกเกียรติ. ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับ
เฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [12] ปรินทร เต็มถาวรศิลป์. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จาก
ไผ่ตง และ ไผ่หมาจู้. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.
- [13] อุษณี ถินถาวร. การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของสาร
คอมโพสิทซิลิกา-ซีโอไลต์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
2554.
- [14] เกรียงศักดิ์ อุดมศิลป์โรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร, 2539.
- [15] วิริยา วิริยะเชชม. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟผงสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจาก
วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [16] วลลิตา แสงอาทิตย์. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8.
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554.
- [17] จักรพงศ์ ศศิธร. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่
ปนเปื้อนในน้ำ. วิศวกรรมทรัพยากรธรณี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [18] อรรถสิทธิ์ พันธุ์ทรัพย์สกุล, วีรานุช หลาง, และ สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล. จลนพลศาสตร์และ
การออกแบบถังปฏิกรณ์ดูดซับสีย้อมผ้ารีแอกทีฟด้วยมวลชีวภาพราไฉ้ชีวิตที่ถูกตรึงด้วยเม็ดเจลไคโต
ซาน. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2557).
- [19] ภูวเดช พรอรุณธรรม. การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน.
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [20] Junyi DU, Daishe WU, Huayun XIAO, and Ping LI. Adsorption of fluoride on clay
minerals and their mechanisms using X-ray photoelectron spectroscopy. Higher
Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010 5(2) (2010): 212–226.

- [21] พงศ์เทพ จันทรสันเทียะ. การปรับปรุงไดอะทอมไมต์โดยวิธีทางเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2551.
- [22] Martinovic, S., Vlahovic, M., Boljanac, T., and Pavlovic, L. Preparation of filter aids based on diatomites. International Journal of Mineral Processing 80(2004) (2006): 255-260.
- [23] สุชาติ สัจจรวงาพนา. ผลของการเผาแร่ดินเบาที่มีต่อการดูดซับโครเมต. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [24] Davis S.N and De Wiest R.J.M. Hydrogeology. John Wiley, New York (1966): 436.
- [25] G. Alagumuthu, V. Veeraputhiran, and R. Venkataraman. Adsorption Isotherms on Fluoride Removal: Batch Techniques. (2012): 170-182.
- [26] Pandi, K. and Viswanathan, N. Synthesis of alginate bioencapsulated nano-hydroxyapatite composite for selective fluoride sorption. Carbohydr Polym 112 (2014): 662-7.
- [27] ดวงพร แก่นแก้ว. การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำ. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [28] G Karthikeyan, Anitha Pius, and G Alagumuthu. Fluoride adsorption studies of montmorillonite clay. Indian Journal of Chemical Technology 12 (2005): 263-272.
- [29] X. Fan, D.J. Parker, and M.D. Smith. Adsorption kinetics of fluoride on low cost materials Water research 37 (2003): 4929–4937.
- [30] มณฑล คงปั้น, สุรศักดิ์ วัฒนเสถ์, เรืองศรี วัฒนเสถ์, และ ละอองดาว นามศรีพันธ์. การพัฒนาชุดตรวจสำเร็จรูปเพื่อหาปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำดื่มผู้วิจัย การวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของความร่วมมือทางวิชาการ ในการศึกษาค้นคว้าเรื่องฟลูออไรด์ ระหว่างศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [31] ชฎาภรณ์ บุญแท้. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

- [32] Ricaud, P. and Lefèvre, F. Chapter 1: Fluorine in the Atmosphere. in Alain,T. (ed.)Advances in Fluorine Science, pp. 1-32: Elsevier, 2006.
- [33] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. กรุงเทพฯ, 2007.
- [34] ยุพดี เส้นขาว. การกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 22 (2557).
- [35] รณบรรจบ อภิรติกุล. การดูดซับโลหะหนักโดยใช้สาหร่ายมหภาคสีเขียวชนิดช่อพริกไทย (Caulerpa lentillifera) และซีโอไลต์ที่ดัดแปลงจากแก้วลอยถ่าน. วิทยาสตรดุษฎีบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [36] Moges, G., Zewge, F., and Socher, M. Preliminary investigations on the defluoridation of water using fired clay chips. Journal of African Earth Sciences 22(4) (1996): 479-482.
- [37] Zevenbergen C, Reeuwijk LP van, Frapporti G, Louws RJ, and Schuiling RD. A simple method for defluoridation of drinking water at village level by adsorption on Ando soil in Kenya. 188 (1996): 225-32.
- [38] Srimurali, M., Pragathi, A., and Karthikeyan, J. A study on removal of fluorides from drinking water by adsorption onto low-cost materials. Environmental Pollution 99(2) (1998): 285-289.
- [39] สุรชาติพิชญ์ จุลฉีต. การหาปริมาณแอนไอออนและแคตไอออนในน้ำฝนโดยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี. วิทยาสตรมหาบัณฑิต, เคมีศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548.
- [40] Hussein Bahrami, Jaber Safdari, and Mohammad Ali. Adsorption of hydrogen fluoride onto activated carbon under vacuum conditions: equilibrium, kinetic and thermodynamic investigations. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly 18(4) (2012): 497-508.
- [41] ลาวัญญ์ ลาสุทธิ. การดูดซับโซเดียมเบนโซเอตบนถ่านกัมมันต์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววฤชกร รักซ้อน เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2532 ในจังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์ เมื่อปี พ.ศ. 2550 หลังจากนั้นได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2554 และได้ศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2555

