

การปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่าน
กระดุกและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Release of dissolved organic carbon and ions from fluoride adsorption process by
bone char and granular activated carbon



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
โดย	นายกฤษกร ศรีรังสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ณัฐพร พิมพะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปียากร)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ณัฐพร พิมพะ)

----- กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัง)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ หงษ์สวัสดิ์)

กฤษกร ศรีรังสิต : การปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด. (Release of dissolved organic carbon and ions from fluoride adsorption process by bone char and granular activated carbon) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ปริญญาณ ปัญญาพลกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ณีภูธร พิมพะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูก (BC) และถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงศึกษาการปลดปล่อยสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) จากถ่านกระดูก และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ DOC ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) จากการศึกษาแบบที่ละเทพบว่า BC มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์มากกว่าถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี เนื่องจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีทำให้สารไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ (HAP) ภายในวัสดุดูดซับลดลง โดยจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ด้วย BC สอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเหมือนและไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง ขณะที่จลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ DOC ด้วย GAC สอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเหมือนและไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง และแบบเรดลิกซ์และปีเตอร์สัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออน พบว่าฟลูออไรด์ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) เป็นไอออนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทั้งนี้กลไกหลักของการกำจัดฟลูออไรด์และ Ca^{2+} คือการแลกเปลี่ยนไอออนและการตกตะกอนจากปฏิกิริยาทางเคมี ตามลำดับ และผลจากการแลกเปลี่ยนไอออนของฟลูออไรด์ทำให้ PO_4^{3-} ถูกปลดปล่อยออกสู่สารละลาย จากการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่าการเพิ่มความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ ส่งผลให้เวลา ณ จุดความเข้มข้นเบรททรูเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ยอดการดูดซับลดลง โดยกราฟเบรททรูที่ได้จากการทดลองทั้งกรณีการดูดซับฟลูออไรด์โดยถ่านกระดูกและการดูดซับ DOC โดย GAC สอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส ขณะที่การปลดปล่อย DOC ของระบบคอลัมน์ BC มีค่ามากที่สุดในช่วงเริ่มต้นการทดลองและลดลงตามระยะเวลา

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ นิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970423521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Adsorption, Fluoride, Bone char, Dissolved organic carbon, Granular activated carbon

Kritsakorn Srirangsit : Release of dissolved organic carbon and ions from fluoride adsorption process by bone char and granular activated carbon. Advisor: Assoc. Prof. Patiparn Punyapalukul, Ph.D. Co-advisor: Nuttaporn Pimpha, Ph.D.

This study aimed to investigate adsorption capacity of fluoride (F^-) by conventional bone char (BC), and chemically activated bone char (by sodium hydroxide and potassium hydroxide), as well as evaluating the release of dissolved organic carbon (DOC) from BC. Moreover, adsorption of DOC by granular activated carbon (GAC) was also investigated. In batch adsorption, obtained results indicated that pristine BC had higher F^- removal efficiency than chemically activated bone char due to the decrease of hydroxyapatite (HAP) in bone char structure after chemical activation. The adsorption kinetics and isotherms of F^- by BC were well described by the pseudo-first-order kinetic model and linear isotherm model, respectively. Whereas, the adsorption kinetic and isotherm of DOC by GAC was well fitted by the pseudo-second-order kinetic model and both linear and Redlich & Peterson isotherm models, respectively. The concentration of F^- , calcium (Ca^{2+}) and phosphate (PO_4^{3-}) was significantly changed. Ion-exchange and chemical precipitation was expected to be the main mechanism for the changing of F^- and Ca^{2+} , respectively. And that the effect of ion-exchange mechanism might release PO_4^{3-} into the solution. In the column test, increasing length in a column can increase breakthrough time while adsorbent's usage rate was decreased. The Thomas model can be fitted well with the experimental data of column test for both fluoride removal by BC and DOC removal by GAC. Whereas, the DOC release by BC column was a peak at the beginning of the experiment and decreased with time.

Field of Study: Environmental Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยพระคุณของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ณัฐพร พิมพะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาสละเวลา แนะนำ ให้คำปรึกษา และ ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนสนับสนุน ทุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร และ คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนิจ และ ดร.ภาณุ หงษ์สวัสดิ์ ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้และได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ห้องปฏิบัติการนาโนไฮบริดและนาโนคอมโพสิต หน่วยวิจัยเขตรนาโนและสิ่งแวดล้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์รามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กฤษกร ศรีรังสิต

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ข้อมูลพื้นฐานหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน.....	5
2.2 ฟลูออไรด์ (Fluoride).....	10
2.3 สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAP).....	10
2.4 คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC).....	11
2.5 การบำบัดฟลูออไรด์ด้วยเทคโนโลยีต่างๆ.....	12
2.6 ทฤษฎีการดูดซับ (ปฎิภาณ, 2014).....	15
2.6.1 กระบวนการดูดซับ (adsorption process).....	15

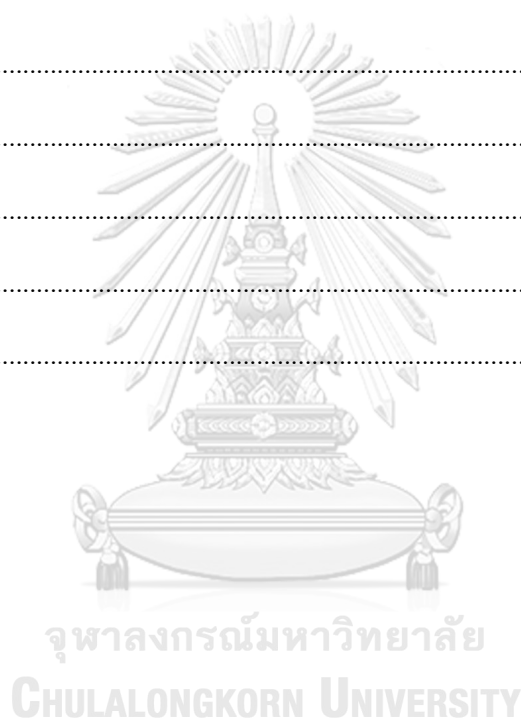
2.6.2 ประเภทของการดูดซับ	16
2.6.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)	16
2.6.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption).....	17
2.6.3 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium).....	17
2.6.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetic).....	17
2.6.4.1 สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic)	18
2.6.4.2 สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second order kinetic)	18
2.6.4.3 กลไกการดูดซับ.....	19
2.6.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm).....	19
2.6.5.1 สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)	19
2.6.5.2 สมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Fruendlich isotherm).....	20
2.6.5.3 สมการไอโซเทอมแบบซิปส์ (Sips isotherm)	20
2.6.5.4 สมการไอโซเทอมแบบเรดลิชและปีเตอร์สัน (Redlich and Peterson Isotherm).....	21
2.6.5.5 สมการไอโซเทอมแบบเส้นตรง (Linear Isotherm).....	21
2.6.6 ปัจจัยทางกายภาพ-เคมีที่มีผลต่อการดูดซับมลสารในวัฏภาคน้ำ	21
2.6.6.1 อุณหภูมิ (temperature).....	22
2.6.6.2 ขนาดพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ	22
2.6.6.3 ขนาดและโครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับ.....	22
2.6.6.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ.....	22
2.6.6.5 ลักษณะสมบัติของตัวถูกดูดซับ (มลสาร).....	22
2.6.6.6 ค่าพีเอชของตัวทำละลาย (สารละลาย)	23
2.6.6.7 ความปั่นป่วน (turbulence).....	23
2.6.6.8 สารรบกวน.....	24

2.6.7 การดูดซับแบบคอลัมน์	24
2.6.7.1 แบบจำลองของโทมัส.....	25
2.6.7.2 สมการของโบฮาร์ทและอดัมส์	26
2.6.7.3 ระยะเวลาที่กักเก็บในคอลัมน์เปล่า (Empty Bed Contact Time, EBCT).....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการอุบัติขึ้นและความเป็นพิษของฟลูออไรด์	27
2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติในการกำจัดฟลูออไรด์	30
2.7.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ถ่านกระดูกเป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดฟลูออไรด์	38
2.7.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการกระตุ้นวัสดุดูดซับด้วยสารเคมี	42
2.7.5 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับ	43
2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49
3.1 การเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย.....	49
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	49
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	49
3.2 การดำเนินการวิจัย.....	50
3.2.1 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ.....	52
3.2.1.1 การสังเคราะห์ถ่านกระดูก	52
3.2.1.2 การสังเคราะห์ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี	52
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของวัสดุดูดซับ	53
3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	53
3.2.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	53
3.2.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	53

3.2.2.4 การศึกษาลักษณะสัมพันธภาพของวัสดุดูดซับ	54
3.2.2.5 การศึกษาค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุมเป็นศูนย์ (Point of zero charge).....	54
3.2.2.6 การศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของวัสดุดูดซับ (Anion Exchange Capacity, AEC).....	54
3.2.2.7 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	55
3.2.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท.....	56
3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาลจริง.....	56
3.2.3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	56
3.2.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ.....	56
3.2.3.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของฟลูออไรด์.....	57
3.2.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	58
3.2.3.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์	59
3.2.3.7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	59
3.2.3.8 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์	60
3.2.4 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์	61
3.2.4.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์.....	61
3.2.4.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์.....	62
3.2.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์	62
3.2.4.4 การศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์.....	63
3.2.5 วิธีการวิเคราะห์	63
3.2.5.1 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์.....	63
3.2.5.2 การตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนลบ.....	63

3.2.5.3 การตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนบวก.....	64
3.2.5.4 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ.....	64
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	65
4.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	70
4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	71
4.2.3 การวิเคราะห์ความเป็นประจุ.....	72
4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	73
4.2.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ	75
4.3.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	76
4.3.2 กลไกการแพร่ภายในอนุภาค	81
4.3.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	82
4.3.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์.....	88
4.4 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์.....	90
4.4.1 การศึกษากราฟเบรกกทงของชั้นวัสดุดูดซับที่ความยาวต่างๆ	90
4.4.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์.....	99
4.4.3 การศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	101
4.4.4 การศึกษาการออกแบบระบบคอลัมน์.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการวิจัย	107
5.1.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	107
5.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ BC	107
5.1.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	108
5.1.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	108
5.1.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบที่ละเท	108

5.1.6 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์	109
5.1.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรต์ในระบบคอลัมน์	109
5.1.8 การศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์	109
5.1.9 การศึกษาการออกแบบคอลัมน์	109
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม	111
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก.....	117
ภาคผนวก ข.....	122
ภาคผนวก ค.....	126
ประวัติผู้เขียน	132



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1	คุณภาพน้ำก่อนเข้าและหลังเข้าระบบผลิตน้ำประปา.....	9
ตารางที่ 2-2	สรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติในการกำจัดฟลูออไรด์.....	45
ตารางที่ 3-1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ.....	53
ตารางที่ 3-2	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ ...	56
ตารางที่ 3-3	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของฟลูออไรด์.....	57
ตารางที่ 3-4	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ .	58
ตารางที่ 3-5	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟลูออไรด์.....	59
ตารางที่ 3-6	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	60
ตารางที่ 3-7	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนต่างๆ ภายหลังกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์.....	61
ตารางที่ 4-1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบนพื้นผิววัสดุดูดซับด้วยวิธี EDX.....	67
ตารางที่ 4-2	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากวัสดุดูดซับ BC	74
ตารางที่ 4-3	ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและความสามารถในการคายซับของวัสดุดูดซับ BC	75
ตารางที่ 4-4	ค่าตัวแปรสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC	78
ตารางที่ 4-5	ค่าตัวแปรสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC.....	80
ตารางที่ 4-6	ค่าคงที่อัตราการแพร่.....	82
ตารางที่ 4-7	ค่าตัวแปรไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC.....	84
ตารางที่ 4-8	ค่าตัวแปรไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC.....	87
ตารางที่ 4-9	ค่า EBCT และ อัตราการใช้วัสดุดูดซับ BC.....	92
ตารางที่ 4-10	ค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของระบบคอลัมน์ที่ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ BC ต่างๆ	94
ตารางที่ 4-11	ค่า EBCT และ อัตราการใช้วัสดุดูดซับ GAC.....	97

ตารางที่ 4-12 ค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของระบบคอลัมน์ที่ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ GAC
 ต่างๆ.....99

ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วย
 วัสดุดูดซับ BC..... 102

ตารางที่ 4-14 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับคาร์บอน
 อินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC 103



สารบัญรูป

รูปที่ 2-1	อาณาเขตพื้นที่หมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน ตำบลสะเนี่ยน อำเภอเมือง จังหวัดเมือ่งน่าน	5
รูปที่ 2-2	ตำแหน่งแหล่งน้ำหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน ตำบลสะเนี่ยน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน	6
รูปที่ 2-3	แปลนระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน ต.สะเนี่ยน อ.เมือง จ.น่าน	7
รูปที่ 2-4	รูปแบบของสารอินทรีย์ที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ	12
รูปที่ 2-5	กราฟเบรคทรูและขอบเขตการถ่ายเทมวลในระบบคอลัมน์	25
รูปที่ 3-1	แผนผังการดำเนินการวิจัย	51
รูปที่ 4-1	ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	65
รูปที่ 4-2	ผลการวิเคราะห์ XRD ของวัสดุดูดซับ BC ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น	66
รูปที่ 4-3	ผลการวิเคราะห์ XRD ของวัสดุดูดซับ BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น	67
รูปที่ 4-4	ภาพขยายพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC (ก) BC-KOH (ข) BC-NaOH (ค) และ BC-KOH/NaOH (ง) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	68
รูปที่ 4-5	ภาพขยายพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC (ก) BC-KOH (ข) BC-NaOH (ค) และ BC-KOH/NaOH (ง) ที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า	69
รูปที่ 4-6	ผลการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของวัสดุดูดซับ BC	71
รูปที่ 4-7	กราฟไอโซเทอมตาม IUPAC	71
รูปที่ 4-8	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC	72
รูปที่ 4-9	ค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจรรวมเป็นศูนย์ (pH_{zpc}) ของวัสดุดูดซับ BC	73
รูปที่ 4-10	กราฟจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากวัสดุดูดซับ BC	74
รูปที่ 4-11	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของวัสดุดูดซับ BC	76
รูปที่ 4-12	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC และ GAC	77
รูปที่ 4-13	กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC	78
รูปที่ 4-14	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC	79

รูปที่ 4-15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC	80
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์และคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำกับเวลาโดยวัสดุดูดซับ BC และ GAC.....	82
รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC และ GAC.....	83
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC	84
รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC ...	86
รูปที่ 4-20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC.....	87
รูปที่ 4-21 กราฟความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของไอออนบวกและลบจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC	89
รูปที่ 4-22 รูปแบบการทดลองกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์	90
รูปที่ 4-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ผ่านระบบคอลัมน์ BC ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆกับเวลา.....	91
รูปที่ 4-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับ BC.....	92
รูปที่ 4-25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ที่มีความสูงของวัสดุดูดซับ BC 8 10 และ 15 เซนติเมตร	94
รูปที่ 4-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์และปริมาตรน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์ BC ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆ	95
รูปที่ 4-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ DOC ที่ผ่านระบบคอลัมน์ GAC ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆกับเวลา.....	96
รูปที่ 4-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับ GAC.....	97
รูปที่ 4-29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์ที่มีความสูงของวัสดุดูดซับ GAC 10 12 และ 15 เซนติเมตร.....	99

รูปที่ 4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนต่างๆที่ผ่านระบบคอลัมน์ที่ความยาว
 ต่างๆกับเวลา 100

รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์
 ยาว 12 เซนติเมตรกับเวลา..... 101

รูปที่ 4-32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทฐ์ในการดูดซับฟลูออไรด์
 ด้วยวัสดุดูดซับ BC ในระบบคอลัมน์..... 102

รูปที่ 4-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทฐ์ในการดูดซับคาร์บอน
 อินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC ในระบบคอลัมน์.....103



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟลูออไรด์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของแร่ธาตุในชั้นหิน ทำให้ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติมีฟลูออไรด์ละลายอยู่ ซึ่งโดยปกติแล้วแหล่งน้ำบาดาลส่วนใหญ่มักมีค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่าแหล่งน้ำผิวดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของแร่ธาตุและชั้นหินต่างๆ ฟลูออไรด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการรักษาสุขภาพช่องปาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ช่วยลดการสะสมแบคทีเรียซึ่งเป็นสาเหตุของฟันผุได้ ทำให้มีการเติมฟลูออไรด์ลงในผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายชนิด เช่น ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก หรือน้ำดื่ม อย่างไรก็ตามการได้รับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่สูงติดต่อกันเป็นระยะเวลาานาน ทำให้เกิดผลกระทบต่างๆต่อร่างกายมากมาย เช่น ฟันตกกระ ภาวะภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ำ เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ลดประสิทธิภาพการทำงานของสมอง ปัญหาเกี่ยวกับการสืบพันธุ์ และความเสี่ยงที่อาจจะเกิดโรคชนิดอื่นๆได้ (Zuo และคณะ, 2018) รายงานคุณภาพน้ำบาดาลของประเทศต่างๆทั่วโลกพบว่า แหล่งน้ำบาดาลส่วนใหญ่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ (มากกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) เช่น แหล่งน้ำบาดาลหลายเมืองในประเทศอินเดียมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์เฉลี่ยสูงตั้งแต่ 20 ถึง 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร (Sharma และคณะ, 2017) แหล่งน้ำบาดาลร้อยละ 16 ใน 17 เมืองของประเทศปากีสถาน มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์เฉลี่ยตั้งแต่ 1.6 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร (Tahir และ Rasheed, 2013) สำหรับข้อมูลในประเทศไทยพบว่า น้ำบาดาลในอำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ร้อยละ 26.7 มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (Namkaew และ Wiwatanadate, 2012) และยังมีข้อมูลว่าน้ำบาดาลร้อยละ 31 จากบ่อน้ำตื้น และร้อยละ 18 จากบ่อน้ำลึกของจังหวัดเชียงใหม่ และน้ำบาดาลร้อยละ 35 จากบ่อน้ำลึก และร้อยละ 7 จากบ่อน้ำตื้นของจังหวัดลำพูน มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (Chuah และคณะ, 2016)

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปัญหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานในแหล่งน้ำบาดาลเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้แหล่งน้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภคในระยะยาวได้ โดยแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การใช้กระบวนการบำบัดน้ำต่างๆในการกำจัดฟลูออไรด์ เช่น การตกตะกอนทางเคมี การตกตะกอนทางไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนไอออน เทคโนโลยีเมมเบรน เป็นต้น อย่างไรก็ตามแม้กระบวนการดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ แต่ล้วนมีต้นทุนในการเดินระบบที่สูง การดูแลรักษาระบบยาก และจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีความรู้ในการเดินระบบ (Jadhav และคณะ, 2015) ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้บำบัดน้ำในพื้นที่ชนบทหรือพื้นที่ห่างไกลความเจริญ กระบวนการการดูดซับเป็นหนึ่งในระบบบำบัดน้ำที่เหมาะสมในการกำจัดฟลูออไรด์ เนื่องจากต้นทุนในการเดินระบบต่ำ การ

ดูแลรักษาระบบง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีความรู้ในการเดินระบบมากนัก ทำให้กระบวนการดูดซับเป็นระบบที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานจริงมากที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ของกระบวนการดูดซับขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการเดินระบบ ดังนั้นวัสดุดูดซับที่ใช้จึงมีความสำคัญอย่างมาก ปัจจุบันมีการนำเศษวัสดุธรรมชาติหรือของเสียจากเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดฟลูออไรด์จำนวนมาก เช่น ซีลีเยอ ฟางข้าวสาลี ชานอ้อย เปลือกกล้วย ใบหว่า กากกาแฟ แกลบ เปลือกไข่ ชั่งข้าวโพด กะลามะพร้าว ถ่านกระดุก เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการเลือกวัสดุดูดซับสำหรับการใช้งานจริงพบว่า ถ่านกระดุกเป็นวัสดุดูดซับที่มีความเป็นไปได้สูงสุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูง ซึ่งเป็นผลมาจากสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อยู่ภายในถ่านกระดุก (NA Medellin-Castillo และคณะ, 2014) ประกอบกับมีวิธีการสังเคราะห์วัสดุที่ง่าย โดยใช้เพียงกระบวนการเผาเพียงอย่างเดียว ถึงแม้ถ่านกระดุกจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ที่ดี เนื่องจากงานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนด้วยวิธีดังกล่าวรวมกับกระบวนการเผา สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุดูดซับ (Shang และคณะ, 2015) ลดระยะเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการเผาลงได้ อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านกระดุกเป็นวัสดุดูดซับยังมีข้อจำกัดเรื่องการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ออกจากถ่านกระดุก ซึ่งการแก้ปัญหาอาจทำได้โดยการเพิ่มถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดลงไปในช่วงวัสดุดูดซับด้วย เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำมวลโมเลกุลต่ำถึงปานกลางได้ (Gibert และคณะ, 2013)

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุก ถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เพื่อเลือกวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุด ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เพื่อกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ออกมาจากถ่านกระดุกหลังการดูดซับฟลูออไรด์ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนบวกและลบในน้ำที่ผ่านการดูดซับฟลูออไรด์ เพื่อทราบกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุดูดซับที่เลือก เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน จะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างครบวงจร ทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดดังกล่าวมีคุณภาพที่ดี สามารถนำไปใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้อย่างปลอดภัย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกและถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากการใช้ถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ปลดปล่อยจากถ่านกระดุกด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.2.4 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการน้ำดี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการโครงสร้างนาโนไฮบริดและนาโนคอมโพสิต หน่วยวิจัยเขตรนาโนและสิ่งแวดล้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยี

1.3.2 ใช้น้ำบาดาลจริง โดยนำน้ำมาจากหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน ตำบลสะเนียน อำเภอเมืองจังหวัดน่าน

1.3.3 วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ถ่านกระดุก ถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด โดยถ่านกระดุกที่ใช้จะถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง ขณะที่ถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีจะถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาพร้อมกับสารเคมี

1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับที่ได้ทั้งโครงสร้างผลึก พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นที่ผิว ประจุบนพื้นผิว และการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดุก

1.3.5 ศึกษาการดูดซับในระบบที่ละลายด้วยน้ำบาดาลจริงที่ปรับความเข้มข้นของฟลูออไรด์เพื่อหาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.3.6 ศึกษาการดูดซับในระบบที่ละลายด้วยน้ำคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดุก เพื่อหาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.3.7 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนต่างๆในระบบแบบที่ละลายและแบบคอลัมน์ภายหลังกระบวนการการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.3.8 ศึกษาการดูดซับในระบบคอลัมน์ด้วยน้ำบาดาลจริงด้วยถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อหากราฟเบรคทรูที่ความหนาของชั้นวัสดุดูดซับต่างๆ

1.3.9 ศึกษาการดูดซับในระบบคอลัมน์ด้วยน้ำคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดุก เพื่อหากราฟเบรคทรูที่ความหนาของชั้นวัสดุดูดซับต่างๆ

1.3.10 ศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดุกในระบบคอลัมน์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

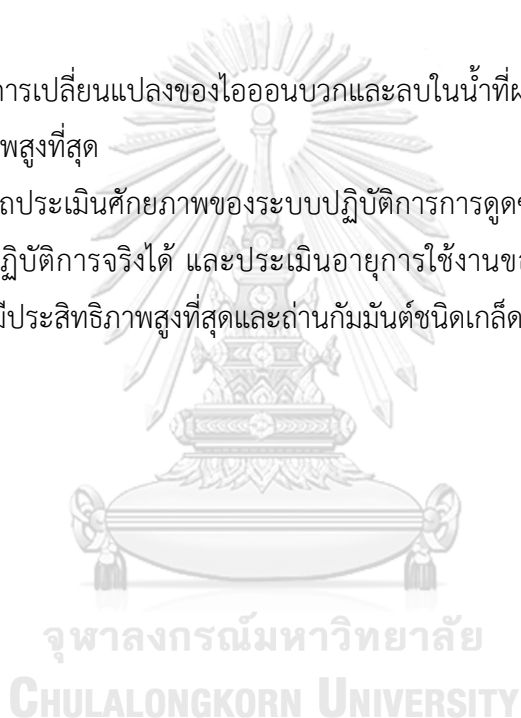
1.4.1 ทราบถึงศักยภาพการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุกและถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี

1.4.2 ทราบปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ปลดปล่อยจากถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.4.3 ทราบประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดุกด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

1.4.4 ทราบการเปลี่ยนแปลงของไอออนบวกและลบในน้ำที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

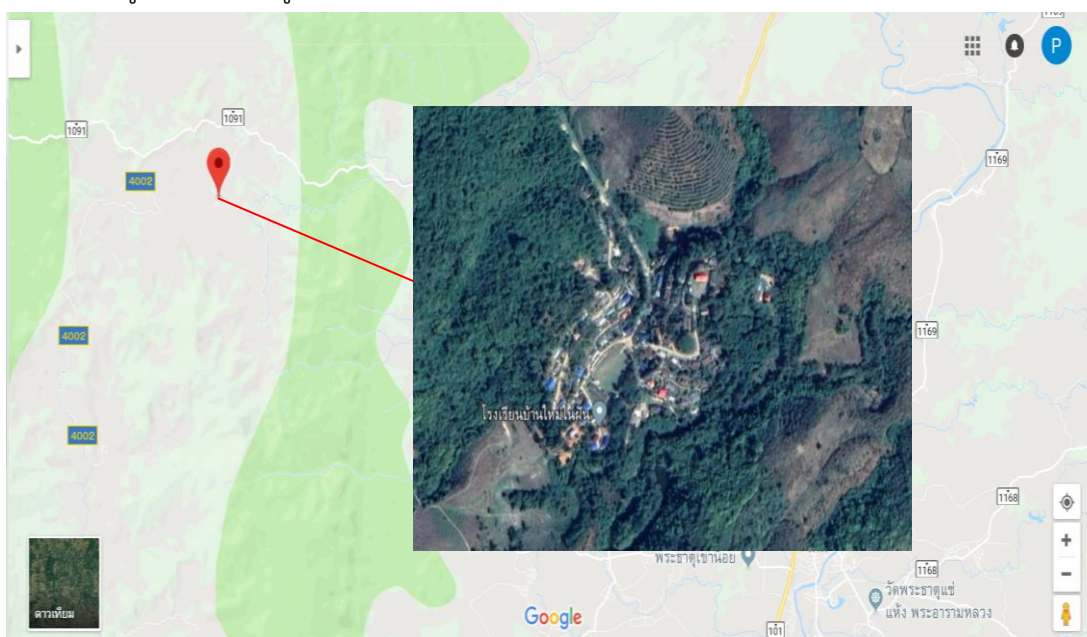
1.4.5 สามารถประเมินศักยภาพของระบบปฏิบัติการการดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบปฏิบัติการจริงได้ และประเมินอายุการใช้งานของระบบดูดซับแบบผสมผสานระหว่างถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพื้นฐานหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน

หมู่บ้านบ้านใหม่ในฝันตั้งอยู่ใน ตำบลสะเนียน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน ก่อตั้งขึ้นในปี พ.ศ. 2526 โดยมีจุดประสงค์ให้คนชนเผ่าลัวะที่มีถิ่นอาศัยอยู่บนภูเขาย้ายลงมาอาศัยบริเวณพื้นที่ราบด้านล่าง เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตและความเป็นอยู่ให้ดีขึ้น โดยรัฐบาลได้จัดสร้างระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานต่างๆให้ เช่น ระบบน้ำสำหรับอุปโภค-บริโภค ระบบคมนาคม ระบบไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจุบันมีประชากรอาศัยในหมู่บ้านทั้งหมด 394 คน ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรเป็นหลัก โดยอาณาเขตพื้นที่หมู่บ้านแสดงดังรูปที่ 2-1



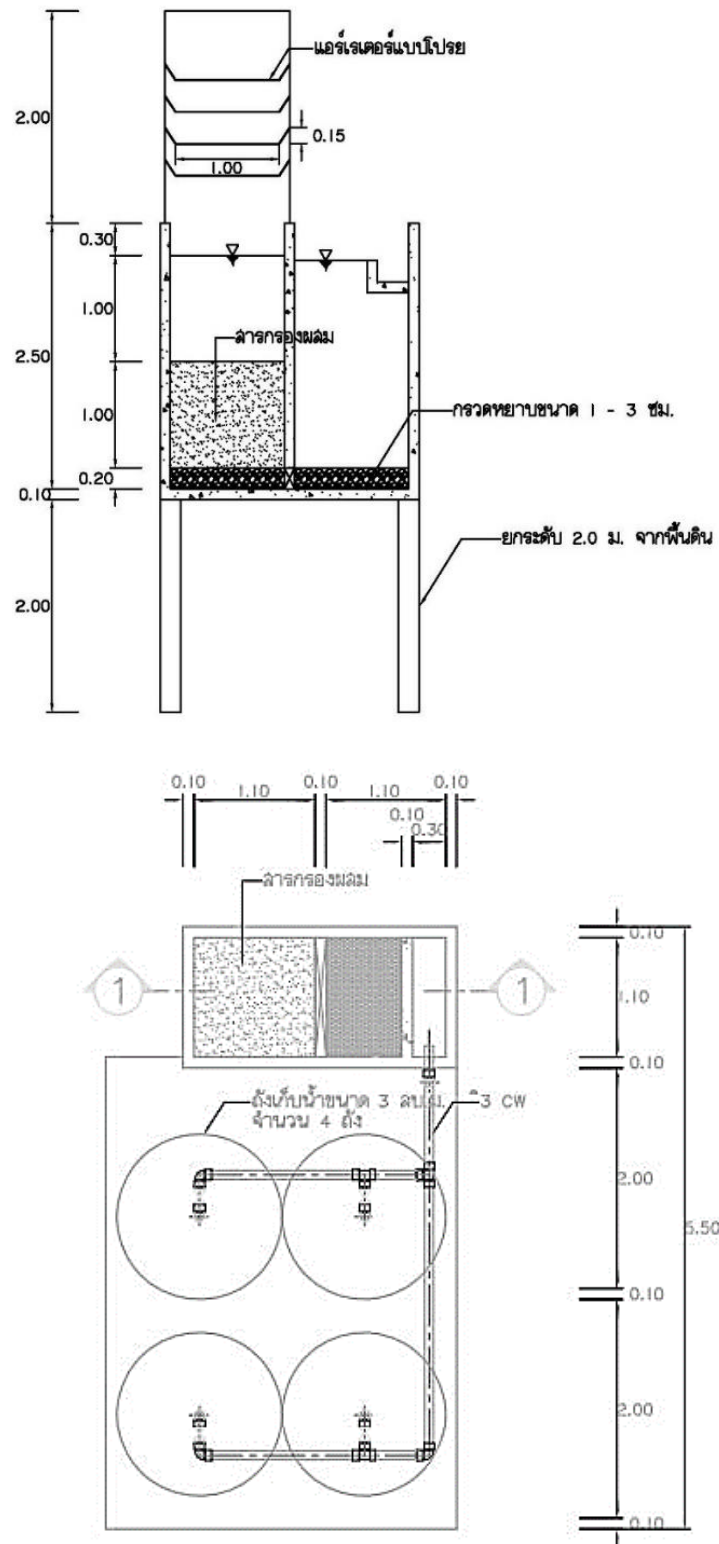
รูปที่ 2-1 อาณาเขตพื้นที่หมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน ตำบลสะเนียน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน

แม้ว่าหมู่บ้านจะมีระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานครบถ้วนแล้ว แต่น้ำสำหรับบริโภคยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญของหมู่บ้าน เนื่องจากแหล่งน้ำหลักที่ใช้ในหมู่บ้านมีเพียง 3 แห่งคือ บ่อบาดาลบริเวณทางเข้าหมู่บ้าน บ่อบาดาลโรงเรียน และลำธารหลังหมู่บ้าน แสดงดังรูปที่ 2-2 ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำข้างต้นพบว่า มีเพียงบ่อบาดาลโรงเรียนเท่านั้นที่มีคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับบริโภค ขณะที่แหล่งน้ำอื่นมีคุณภาพไม่คงที่และมีการปนเปื้อนสารตกค้างต่างๆ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าบ่อบาดาลโรงเรียนจะมีคุณภาพน้ำที่ดีที่สุด แต่ยังคงพบปัญหาเรื่องกลิ่นของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (มากกว่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้ประชาชนในพื้นที่ไม่มั่นใจที่จะนำน้ำจากแหล่งดังกล่าวมาบริโภค ทำให้ต้องซื้อน้ำสำหรับบริโภคจากแหล่งอื่น อย่างไรก็ตามเนื่องจากหมู่บ้านตั้งอยู่ในพื้นที่ห่างไกล ทำให้การขนส่งน้ำสำหรับบริโภคเป็นไปอย่างยากลำบาก และมีค่าใช้จ่ายที่สูง



รูปที่ 2-2 ตำแหน่งแหล่งน้ำหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝืน ตำบลสะเนียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน

ปัจจุบันหมู่บ้านได้มีการสร้างระบบประปาแบบกรองช้า ซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงทั้งหมดโดยใช้
 ปิมน้ำของบ่อบาดาลสูบเข้าระบบเพียงครั้งเดียว โดยระบบดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ
 แอร์เรเตอร์แบบโปรย เพื่อเปลี่ยนสภาพเหล็กที่ละลายน้ำให้ตะกอน และระบบการกรองด้วยวัสดุดูด
 ซับแบบผสม (ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและทรายหยาบ) เพื่อกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ต่างๆ จาก
 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อผ่านระบบดังกล่าวพบว่า น้ำที่ได้มีคุณภาพน้ำที่ดีขึ้น แต่ความเข้มข้นของ
 ฟลูออไรด์ยังคงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งอาจเกิดจากวัสดุดูดซับที่ใช้ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัด
 ฟลูออไรด์ โดยแปลนระบบผลิตน้ำประปาของหมู่บ้านที่ใช้อยู่ปัจจุบันแสดงดังรูปที่ 2-3 และข้อมูล
 คุณภาพน้ำก่อนและหลังกระบวนการบำบัดดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2-1



รูปที่ 2-3 แพลนระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านบ้านใหม่ในพื้นที่ ต.สะเนียน อ.เมือง จ.น่าน

ตารางที่ 2-1 คุณภาพน้ำก่อนเข้าและหลังเข้าระบบผลิตน้ำประปา

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำก่อนเข้าและหลังเข้าระบบผลิตน้ำประปา							
	ตุลาคม 61		ธันวาคม 61		มกราคม 62		กรกฎาคม 62	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
ความเป็นกรด-ด่าง	7.1	7.7	7.4	8.0	7.6	8.1	8.63	-
ความขุ่น (NTU)	1.12	0.95	1.08	0.65	0.14	1.22	0.53	-
สภาพนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	507	419	598	583	642	550	562	-
สภาพความเป็นด่าง (mg/l as CaCO_3)	330	258	364	392	380	320	420	-
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l as CaCO_3)	112	92	68	56	70	48	72	-
ความกระด้างจากแคลเซียม (mg/l as CaCO_3)	88	46	48	38	54	28	47	-
ความกระด้างจากแมกนีเซียม (mg/l as CaCO_3)	24	46	20	18	16	20	25	-
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l)	280	295	333	327	213	340	300	-
ฟลูออไรด์ (mg/l)	1.83	0.32	2.60	2.06	3.24	0.88	3.6	-

2.2 ฟลูออไรด์ (Fluoride)

ฟลูออรีนเป็นธาตุหมู่ที่ 7 มีน้ำหนักอะตอม 18.998 จุดหลอมเหลว -219.62 องศาเซลเซียส (ที่ 1 atm) จุดเดือด 188.12 องศาเซลเซียส (ที่ 1 atm) และความถ่วงจำเพาะ 1.505 (Haynes, 2014)

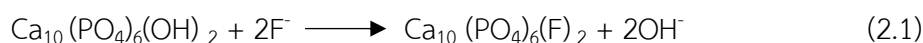
ฟลูออรีนจัดเป็นธาตุที่เบาที่สุดในกลุ่มฮาโลเจน และมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) สูงที่สุด หรือกล่าวได้ว่ามีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนสูงที่สุด ทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุชนิดอื่นๆ ได้ดี โดยในสภาพแวดล้อมทั่วไปในธรรมชาติไม่พบฟลูออรีนในรูปของธาตุ แต่พบในรูปของฟลูออไรด์ไอออน (F^-) เนื่องจากมีแนวโน้มสูงที่จะทำปฏิกิริยาและรวมตัวกับธาตุอื่นๆ ด้วยพันธะทางไฟฟ้าที่แข็งแรง และเกิดเป็นสารประกอบไอออนิกได้ ฟลูออไรด์ส่วนใหญ่สะสมอยู่ในแร่ธาตุและหินชนิดต่างๆ ในพื้นโลก โดยมีขนาดของไอออน (ionic radius) ใกล้เคียงกับไฮดรอกไซด์ไอออนมาก จึงสามารถแทนที่ในตำแหน่งกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ในแร่ธาตุที่ก่อตัวซ้ำของหินแกรนิตได้ ทำให้พบฟลูออไรด์ในแผ่นเปลือกโลกประมาณร้อยละ 0.06 ถึง 0.09 โดยปกติแล้วความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแม่น้ำหรืออ่างเก็บน้ำจะมีค่าน้อยกว่าในน้ำทะเล ขณะที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบาดาลอาจมีค่าสูงกว่ามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของแร่ธาตุหรือหินชนิดต่างๆ

ฟลูออไรด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการรักษาสุขภาพช่องปาก เนื่องจากช่วยลดการสะสมของแบคทีเรียที่ผลิตกรดซึ่งเป็นสาเหตุในการทำลายสุขภาพฟัน โดยนำฟลูออไรด์มาปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสารเคลือบฟัน ทำให้มีความสามารถในการต้านทานกรดที่เป็นสาเหตุของฟันผุได้ ด้วยเหตุผลข้างต้นทำให้มีการเติมฟลูออไรด์ลงในยาสีฟัน และในบางประเทศมีการเติมฟลูออไรด์ลงในน้ำดื่ม อย่างไรก็ตามการได้รับฟลูออไรด์ปริมาณมากเป็นระยะเวลานานสามารถก่อให้เกิดอันตรายได้ โดยเป็นสาเหตุของการเกิดโรคฟลูออโรซิส (Fluorosis) ซึ่งอาการที่พบได้บ่อยที่สุดของโรคดังกล่าวคือ การทำให้ฟันตกกระและทำลายโครงสร้างของฟัน ขณะที่การรับฟลูออไรด์ปริมาณมากเป็นระยะเวลานานอาจส่งผลให้มีการสะสมของฟลูออไรด์ในกระดูก ทำให้มีอาการลักษณะพิการที่เรียกว่า ขาโก้ง (crippling skeletal fluorosis) ทั้งนี้อาการที่เกิดขึ้นเป็นอาการที่ไม่สามารถรักษาให้กลับมาเหมือนเดิมได้ (Chuah และคณะ, 2016)

2.3 สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAP)

สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) เป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญทางชีววิทยาและเคมี ด้วยลักษณะของโครงสร้าง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และความสามารถในการจับโมเลกุลสารอนินทรีย์ขนาดต่างๆ ทำให้สารประกอบดังกล่าวได้รับความสนใจอย่างมากในช่วง 2

ทศวรรษที่ผ่านมา สารไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไอออนบวกชนิดต่างๆได้ดี เช่น ตะกั่ว (Pb^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) เป็นต้น โดยเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของ แคลเซียมในสารไฮดรอกซีอะพาไทต์กับโลหะหนักไอออนบวกในสารละลาย อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์อีกด้วย โดยเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารไฮดรอกซีอะพาไทต์กับฟลูออไรด์ไอออนในสารละลาย (NA Medellin-Castillo และคณะ, 2014) โดยความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในสารละลายจะลดลงก็ต่อเมื่อฟลูออไรด์ไอออนเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Sawangjang, 2015) ดังสมการที่ 2.1



จากสมการข้างต้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งค่าพีเอชของสารละลายที่ได้จะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่อยู่ในสารละลาย (Ismail และ AbdelKareem, 2015)

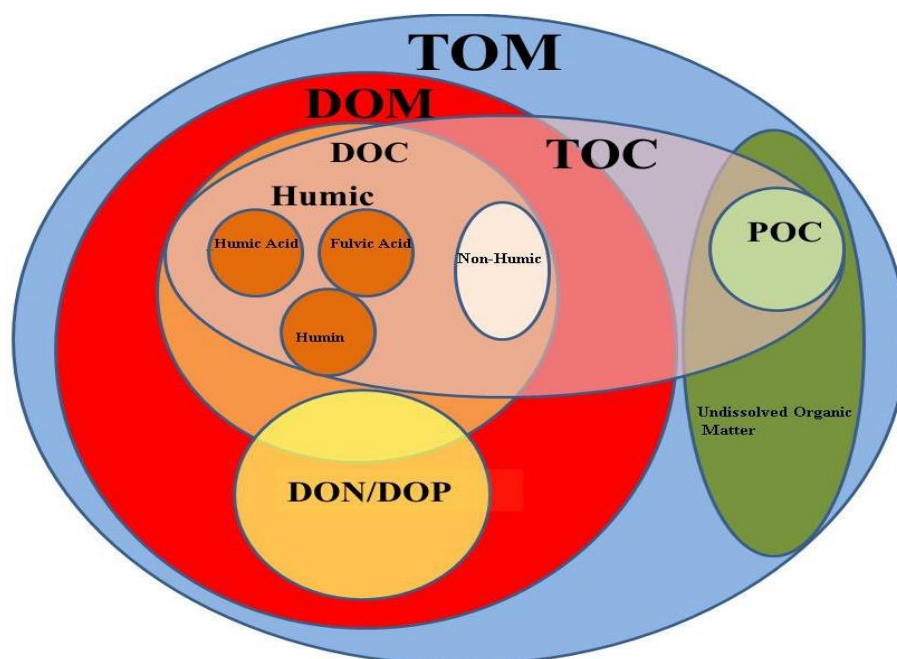
2.4 คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC)

สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM) สามารถพบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป และเป็นส่วนประกอบสำคัญในสภาพแวดล้อมทางน้ำ ซึ่งอาจเกิดจากผลผลิตในกระบวนการทางชีววิทยา และปฏิกิริยาเคมีของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ลงสู่ดิน หรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ลงสู่แหล่งน้ำ หรือเกิดจากผลผลิตจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำเอง โดยเกิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจนสามารถละลายน้ำได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยทั่วไปมักใช้คำว่าคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) แทน DOM ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว DOC เป็นส่วนหนึ่งของ DOM โดยในทางกายภาพ DOC หมายถึง ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่สามารถผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร ซึ่งอนุภาคที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองได้จะถูกเรียกว่า คาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนที่อยู่ในน้ำ (Particulate organic carbon, POC) (Pagano, Bida และ Kenny, 2014)

โดยทั่วไป DOC สามารถแบ่งออกตามองค์ประกอบเป็นส่วนที่เป็นฮิวมิก (Humic substance) และส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก (Non-humic substance) โดยส่วนที่เป็นฮิวมิกมีส่วนประกอบทั้งสารอินทรีย์ที่คาร์บอนต่อกันเป็นโซ่ยาว (Aliphatic compound) และสารอินทรีย์ที่คาร์บอนจับกันเป็นวง (Aromatic compound) ทั้งนี้ส่วนที่เป็นฮิวมิกมีลักษณะเป็นสารที่มีขั้วและเป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายของดินและพืชน้ำ โดยมีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic organic fraction, HPO) ประกอบด้วย กรดฮิวมิก (Humic acid) และกรดฟัลลิก

(Fulvic acid) ขณะที่ส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิกมีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (Hydrophilic organic fraction, HPI) ประกอบด้วย กรดไฮโดรฟิลิก กรดอะมิโน กรดคาร์บอกซิลิก โปรตีน และ คาร์โบไฮเดรต (Chantanavorakunchai, 2019)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางเคมีของส่วนที่เป็นฮิวมิกและส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก พบว่าส่วนที่เป็นฮิวมิกมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมากกว่าส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก โดยรูปแบบของสารอินทรีย์ที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 รูปแบบของสารอินทรีย์ที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ
(Pagano และคณะ, 2014)

2.5 การบำบัดฟลูออไรด์ด้วยเทคโนโลยีต่างๆ

Jadhav และคณะ (2015) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์ โดยแบ่งเป็นเทคโนโลยีต่างๆ ได้ดังนี้

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) องค์กร CSIR-NEERI ของประเทศอินเดีย ได้พัฒนาเทคนิคที่เรียกว่า Nalgonda ขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดฟลูออไรด์ด้วยการตกตะกอนทางเคมี เทคนิคดังกล่าวมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญกล่าวคือ ขั้นตอนการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟลูออไรด์ เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) เป็นต้น ทำให้ได้สารประกอบไม่ละลายน้ำที่อยู่ในรูปของแคลเซียมฟลูออไรด์ และขั้นตอนการเติมอะลูมิเนียมซัลเฟตหรืออะลูมิเนียมคลอไรด์ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน ทำให้ฟลูออไรด์ถูก

กำจัดออกจากน้ำ น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีดังกล่าวจะมีสภาพความเป็นต่างสูง ซึ่งเป็นผลมาจากเกลือของอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการกำจัดฟลูออไรด์ที่มีประสิทธิภาพค่าพีเอชควรอยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 และปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ใช้ประมาณ 20 เท่าของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำบาดาลได้ถึงร้อยละ 95 ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้แคลเซียมซัลเฟตในการกำจัดฟลูออไรด์ ข้อดีของการใช้เทคนิคนี้คือ ต้นทุนค่ากำจัดต่ำ แต่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ขณะที่ข้อเสียคือ ค่าบำรุงรักษาระบบสูง น้ำที่ได้มีรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมาก และมีอะลูมิเนียมตกค้างอยู่ในน้ำสูง จากการสำรวจพบว่า ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่ตกค้างในน้ำอยู่ระหว่าง 2.01 ถึง 6.86 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับการเดินระบบ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นอะลูมิเนียมที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรงได้

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย (หรืออิมัลชัน) หรือสารปนเปื้อนที่มีตัวกลางเป็นน้ำ หลักการเบื้องต้นคือ การให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้าชนิดแอโนด ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้อะลูมิเนียมหรือเหล็ก ละลายออกมาอยู่ในรูปอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) หรือ เหล็กไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค หรือไอออนที่อยู่ในน้ำ กล่าวคือทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ มีการหักล้างประจุจนมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น และแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตกตะกอน หรือการลอยตะกอน โดยการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยเทคนิคดังกล่าวเกิดจาก ไอออนของอะลูมิเนียมที่ละลายออกมาจากขั้วแอโนด ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) และทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟลูออไรด์จนเกิดเป็นอะลูมิเนียมคอมเพล็กซ์ ($Al(OH)_{3-x}F_x$) ขณะที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาให้ไฮดรอกไซด์ (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) โดยก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลของฟลูออไรด์ไอออน และอะลูมิเนียมคอมเพล็กซ์จับตัวกันเป็นกลุ่มและลอยตัวสู่ด้านบนของระบบ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์เกิดจากการแยกอะลูมิเนียมคอมเพล็กซ์ออกจากเฟสของเหลว ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ทั้งในน้ำดื่มและน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นฟลูออไรด์จาก 10 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือต่ำกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ โดยข้อดีของการใช้เทคนิคนี้คือ ปริมาณตะกอนเกิดขึ้นน้อย และสารเคมีที่ใช้ในระบบน้อย ขณะที่ข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบ ทำให้เพิ่มต้นทุนในการเดินระบบ

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ โดยกลไกการกำจัดเกิดจากการดูดซับมากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากไอออนของฟลูออไรด์มีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนตัวอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำ โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ประจวบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ได้มากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ อย่างไรก็ตามความสามารถในการกำจัดและการคัดเลือกฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับประเภทของเรซิน นอกจากนี้การบรรเทาไอออนของโลหะที่มีอยู่ในน้ำ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของเรซิน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะทำให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ได้สูงที่สุด ข้อดีของเทคนิคดังกล่าวคือ สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้มากกว่าร้อยละ 95 ขณะที่ข้อเสียคือ เรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนมีราคาแพง แม้ว่าจะสามารถฟื้นฟูสภาพ และนำกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง อย่างไรก็ตามการฟื้นฟูสภาพทำให้ได้น้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์จำนวนมาก ทำให้จำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนอีก

เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane technology) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบาดาล โดยอาศัยเยื่อเมมเบรน (Selective Semipermeable) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว ปัจจุบันกระบวนการเมมเบรนที่สำคัญมี 3 แบบ คือ นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) และกระบวนการแยกไฟฟ้าด้วยเมมเบรน (Electro-dialysis) โดยกระบวนการทั้งสามมีหน้าที่และขีดความสามารถไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิสพบว่า นาโนฟิลเตรชันใช้ความดันในการเดินระบบที่ต่ำ มีประสิทธิภาพในการกำจัดโมโนวาเลนซ์ไอออนได้น้อยกว่าร้อยละ 60 ขณะที่รีเวอร์สออสโมซิสมีประสิทธิภาพในการกำจัดโมโนวาเลนซ์ไอออนได้ร้อยละ 90 และสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามข้อเสียของเทคนิคดังกล่าวคือ ใช้ความดันในการเดินระบบที่สูง อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ และสิ้นเปลืองพลังงาน สำหรับกระบวนการแยกไฟฟ้าเมมเบรน เป็นการแยกไอออนของมลสารออกจากน้ำโดยการใช้กระแสไฟฟ้าตรง โดยมีแผ่นเมมเบรน 2 ประเภทคือ แผ่นเมมเบรนที่ยอมเฉพาะไอออนบวกผ่านได้ (Cation Exchange Membrane) และแผ่นเมมเบรนที่ยอมให้เฉพาะไอออนลบผ่านได้ (Anion Exchange Membrane) แผ่นเมมเบรนทั้งสองชนิดจะถูกวางสลับกัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการแยก ชนิดของไอออนผ่านเมมเบรนเข้าไปในแต่ละห้อง (Cell) โดยเหมาะสมที่จะเป็นกระบวนการกำจัดฟลูออไรด์เบื้องต้น เนื่องจากเป็นเทคนิคที่เรียบง่าย และสามารถแก้ปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการเคมีได้ ข้อดีที่เด่นชัดที่สุดคือ สามารถกำจัดมลสารได้มากกว่าร้อยละ 98 โดยใช้ขั้นตอนในการทำให้น้ำบริสุทธิ์มีเพียงขั้นตอนเดียว และไม่มีการใช้สารเคมี ขณะที่ข้อเสียคือ อาจต้องมีกระบวนการคืนกลับแร่ธาตุ (remineralization process) ให้กับน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัด เนื่องจากแร่ธาตุบางชนิดมีความจำเป็นและต้องอยู่ในน้ำดื่ม นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่สูง และปัญหาการกำจัดฟลูออไรด์ที่ถูกแยกออกจากน้ำ

2.6 ทฤษฎีการดูดซับ (ปฏิภาณ, 2014)

2.6.1 กระบวนการดูดซับ (adsorption process)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมลสารจากวัฏภาคของน้ำเข้าสู่พื้นผิวของของแข็ง ทำให้ความเข้มข้นของมลสารเหล่านั้นในน้ำน้อยลง กระบวนการดูดซับในวัฏภาคของน้ำมี 3 องค์ประกอบหลักคือ ตัวกลางดูดซับ (adsorbent) มลสารหรือตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และตัวทำละลาย (Solvent) โดยทุกองค์ประกอบล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

กลไกการดูดซับในวัฏภาคของน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1.) การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของมลสารแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มตัวกลางดูดซับ และเข้าถึงผิวหน้าตัวกลางดูดซับ
- 2.) การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของมลสารแทรกตัวเข้าสู่รูพรุนและช่องว่างของตัวกลางดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
- 3.) ปฏิกริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของมลสารดูดติดผิวของตัวกลางดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ ทำให้ความต้านทานจากกระบวนการนี้ละเลยได้

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออัตราการดูดซับ กล่าวคือ ถ้าอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลเร็ว อัตราการดูดซับของระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วเช่นกัน ขณะที่อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลที่ช้าที่สุดเกิดจากขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุด จะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ โดยขั้นตอนในการดูดซับหรือการเคลื่อนที่ของมลสาร (adsorbate) ไปยังตัวกลางดูดซับ (adsorbent) นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1.) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โดยโมเลกุลของมลสารจะเคลื่อนที่จากของเหลว (bulk solution) ไปยังชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มตัวกลางดูดซับ
- 2.) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวแทรกตัวเข้าที่ผิวหน้าของตัวกลางดูดซับ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion)
- 3.) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่โมเลกุลของมลสารเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวกลางดูดซับ (Pore diffusion) ทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุน
- 4.) การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของมลสารจะถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับนั้น ผ่านปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและโครงสร้างโมเลกุลของมลสาร

ทั้งนี้ขั้นตอนการขนส่งชั้นฟิล์มและการขนส่งภายในอนุภาค จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ

กระบวนการดูดซับถูกนำประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและกระบวนการผลิตน้ำประปา ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ระบบบำบัดน้ำเสียแบบทั่วไปไม่สามารถกำจัดมลสารที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น สีย้อมจากกระบวนการฟอกย้อม สารลดแรงตึงผิวบางประเภท ยาฆ่าแมลง ยาปฏิชีวนะ เป็นต้น แม้จะผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว ความเข้มข้นสารเหล่านี้ยังคงมีสูงซึ่งสามารถสะสมในระบบนิเวศน์และสร้างความเสียหายต่อห่วงโซ่อาหารได้ ดังนั้นจึงเพิ่มกระบวนการดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียส่วนท้าย สำหรับในกระบวนการผลิตน้ำประปา กระบวนการดูดซับถูกใช้เพื่อกำจัดมลสารต่างๆในน้ำดิบที่เป็นสาเหตุของการเกิด สี กลิ่น และรสที่ไม่พึงประสงค์ เช่น สารอินทรีย์จากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ สารอินทรีย์สังเคราะห์ สารอินทรีย์ชนิดต่างๆที่ส่งผลกระทบท่อร่างกาย เป็นต้น โดยมีอยู่ส่วนท้ายของระบบเช่นเดียวกัน

2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับของมลสารบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว ซึ่งเกิดจากการไม่สมดุลระหว่างแรงดึงดูดระหว่างมลสารและตัวกลางดูดซับ ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดทางกายภาพและแรงดึงดูดทางเคมี จึงสามารถแบ่งการดูดซับออกเป็น 2 ประเภทตามแรงดึงดูด ดังนี้

2.6.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้ เกิดจากแรงดึงดูดทางกายภาพชนิดต่างๆ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) แรงไอออนคู่-ขั้ว (Ion-dipole force) แรงไอออนคู่-ขั้วเหนี่ยวนำ (Ion-induced dipole force) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) เป็นต้น โดยเป็นแรงดึงดูดที่ไม่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลของมลสารและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการแบ่งปันหรือถ่ายโอนอิเล็กตรอนร่วมกัน และไม่มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย ส่งผลให้การกำจัดมลสารออกจากตัวกลางดูดซับทำได้ง่าย สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ (reversible) และ เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของมลสาร นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพยังไม่ขึ้นกับพื้นที่ดูดซับจำเพาะ (Site Specific) กล่าวคือ โมเลกุลของมลสารสามารถปกคลุมพื้นผิวตัวกลางดูดซับได้ทั้งหมดโดยไม่เลือกพื้นที่ดูดซับใดพื้นที่หนึ่งเฉพาะ และอัตราเร็วของการดูดซับถูกกำหนดด้วยอัตราถ่ายเทมวลสาร

2.6.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้ เกิดขึ้นเมื่อมลสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวมลสารเดิม กล่าวคือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวของกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน และมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนในการดูดซับมีค่าสูง ส่งผลให้การกำจัดมลสารออกจากตัวกลางดูดซับทำได้ยาก ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (irreversible) และเป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับมักแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามในสถานการณ์จริงการระบุประเภทของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับทำได้ยาก เนื่องจากมีองค์ประกอบต่างๆที่ซับซ้อน และผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างสารอยู่ร่วมกัน (Co-existing compounds) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีความเข้มข้นของมลสารต่ำ

2.6.3 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

สมดุลการดูดซับในวัฏภาคของน้ำ เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของมลสารที่ผิวตัวกลางดูดซับ เท่ากับความเข้มข้นของมลสารในตัวทำละลาย หรือหมายถึงสภาวะที่อัตราการดูดซับและอัตราการคายออกของมลสารบนตัวกลางดูดซับมีค่าเท่ากัน ทำให้ความเข้มข้นของมลสารในตัวทำละลายมีค่าคงที่

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของมลสารที่อยู่ในเฟสของเหลว (C_e) พบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งเรียกว่า สมการไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) การสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวจำเป็นต้องควบคุมสภาวะต่างๆให้คงที่ เช่น อุณหภูมิการดูดซับ ค่าพีเอช ระยะเวลาการกวนผสมจนเข้าถึงสภาวะสมดุล เป็นต้น โดยสมการไอโซเทอมที่ได้ถูกนำไปใช้คำนวณปริมาณตัวกลางดูดซับที่ใช้ควบคุมความเข้มข้นของมลสารไม่ให้เกินค่าที่ต้องการ

2.6.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetic)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับมลสารของวัสดุดูดซับกับเวลา โดยสมการที่นิยมใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับคือ จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second order kinetic) ซึ่งปกติแล้วอัตราการดูดซับมลสารจะมีค่ามากในช่วงเวลาเริ่มต้นของการดูดซับ และจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

2.6.4.1 สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order

kinetic)

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (2.2)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.2 ที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q = 0$ ถึง $q = t$ จะได้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 2.3

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.3)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวกลางดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน (นาที⁻¹)

t คือ ระยะเวลาของการดูดซับ (นาที)

2.6.4.2 สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second order

kinetic)

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (2.4)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.4 ที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q = 0$ ถึง $q = t$ จะได้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 2.5

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.5)$$

โดย k_2 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเสมือน (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

ทั้งอัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (h) และครึ่งเวลาของการดูดซับ (Half-adsorption time) คำนวณได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

$$h = k_2 q_e^2 \quad (2.6)$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e} \quad (2.7)$$

โดยที่ h คือ อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที)

$t_{1/2}$ คือ ครึ่งเวลาของการดูดซับ (นาที)

2.6.4.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถศึกษาได้จากสมการ Intraparticle diffusion ดังสมการที่ 2-8

$$q_t = k_i t^{1/2} \quad (2.8)$$

โดยที่ k_i คือ ค่าคงที่อัตราการแพร่

2.6.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีด้วยกันหลายรูปแบบ โดยรูปแบบที่นิยมนำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการดูดซับมีดังนี้

2.6.5.1 สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สมการแลงเมียร์มีสมมุติฐานคือพื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีหน่วยฟังก์ชันที่เหมาะสมกับมลสารเพียงชั้นเดียว และสามารถยกเว้นผลกระทบของการมีอยู่ของตัวทำละลายได้ สมการแลงเมียร์กำหนดนิยามพื้นฐานสำคัญไว้ 4 ข้อคือ

- 1.) การดูดซับเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวตัวกลางดูดซับเท่านั้น (Adsorption Site)
- 2.) บริเวณพื้นที่ดูดซับของตัวกลางดูดซับสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ได้กับมลสารเป้าหมายเท่านั้น
- 3.) พลังงานในการดูดซับเท่ากันทุกตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ
- 4.) ไม่มีแรงใดๆกระทำกันระหว่างมลสารด้วยกันเอง

จาก 4 ข้อที่กล่าวมาข้างต้น หมายความว่า บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับสามารถดูดซับมลสารได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และมีพื้นที่จำเพาะต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ กล่าวคือ ไม่สามารถดูดซับมลสารเพิ่มเติมได้อีก เมื่อพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับถูกปกคลุมด้วยมลสารทั้งหมด โดยสามารถเขียนสมการแลงเมียร์ได้ดังสมการที่ 2.9

$$q_e = \frac{b q_m C_e}{(1 + b C_e)} \quad (2.9)$$

หรือสามารถเขียนในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{b q_m C_e} \quad (2.10)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของมลสารในตัวทำละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.6.5.2 สมการไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สมการฟรอนด์ลิชมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวกลางดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (heterogeneous) ซึ่งเป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น โดยสามารถเขียนสมการฟรอนด์ลิชได้สมการที่ 2.11

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.11)$$

หรือสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 3.9

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.12)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของมลสารในตัวทำละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

สมการฟรอนด์ลิชมีลักษณะพิเศษคือ สามารถอธิบายค่าความสามารถในการดูดซับได้ทั้งความเข้มข้นสมดุลที่ต่ำมาก ($C_e \rightarrow 0$) และความเข้มข้นสมดุลที่สูงมาก ดังนั้นสมการฟรอนด์ลิชมักใช้ค่า K_F และ n ในการประเมินความชอบระหว่างตัวกลางดูดซับและมลสาร โดยสมการฟรอนด์ลิชถูกใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับอธิบายการดูดซับในสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับที่ชั้นถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลางดูดซับ

2.6.5.3 สมการไอโซเทอมแบบชิปส์ (Sips isotherm)

สมการชิปส์เป็นการรวมสมการแบบแลงเมียร์และสมการฟรอนด์ลิชเข้าด้วยกัน มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า สมการแลงเมียร์-ฟรอนด์ลิชไอโซเทอม ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในการดูดซับแบบชั้นเดียวและหลายชั้น โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.13

$$q_e = \frac{q_m K_S C_e^{\frac{1}{n}}}{1 + K_S C_e^{\frac{1}{n}}} \quad (2.13)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณมลสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของมลสารในตัวทำละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_s, 1/n$ คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับซิปส์

2.6.5.4 สมการไอโซเทอมแบบเรดลิชและปีเตอร์สัน (Redlich and Peterson Isotherm)

สมการเรดลิชและปีเตอร์สัน เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่ประกอบด้วย 3 ตัวแปร โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับแบบหลายชั้นเกิดขึ้นในช่วงแรกเท่านั้น การนำสมการไอโซเทอมชนิดนี้ไปใช้ถูกจำกัดในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้น เนื่องจากความลำบากในการวิเคราะห์ค่าคงที่ โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.14

$$q_e = \frac{K_j C_e}{1 + b_j C_e^\beta} \quad (2.14)$$

โดยที่ K_j คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเรดลิชและปีเตอร์สัน

b_j คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเรดลิชและปีเตอร์สัน

β คือ ตัวประกอบความหลากหลายของพื้นผิว

2.6.5.5 สมการไอโซเทอมแบบเส้นตรง (Linear Isotherm)

สมการแบบเส้นตรง (Linear Isotherm) โดยมีสมมติฐานว่าปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นไม่รุนแรง มีสัดส่วนมวลสารปกคลุมพื้นที่ผิวตัวกลางดูดซับน้อย โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.15

$$q_e = K_p C_e \quad (2.15)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณมวลสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของมวลสารในตัวทำละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_p คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับแบบเส้นตรง

2.6.6 ปัจจัยทางกายภาพ-เคมีที่มีผลต่อการดูดซับมวลสารในวัฏภาคน้ำ

ปัจจัยทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ และมวลสาร รวมถึงองค์ประกอบของน้ำเสีย ย่อมส่งผลกระทบต่อ การดูดซับอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยอาจช่วยขัดขวางหรือส่งเสริมการดูดซับได้ องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีต่างๆที่มีส่วนสำคัญในการดูดซับมีดังนี้

2.6.6.1 อุณหภูมิ (temperature)

โดยทั่วไปการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ มักทำให้มวลสารที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับหลุดออกมา เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้โมเลกุลของมวลสารที่เกาะบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับมีพลังงานในการสั่นสูงขึ้น จึงมีแนวโน้มที่มวลสารจะหลุดออกมาสู่สารละลายได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวกลางดูดซับและมวลสาร เช่น ปฏิสัมพันธ์เป็นแบบคายความร้อน (Exothermic interaction) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

2.6.6.2 ขนาดพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

ขนาดพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ มักแปรผันตรงกับประสิทธิภาพการดูดซับ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีขนาดของโมเลกุลของมวลสารใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับ มวลสารไม่สามารถเข้าสู่พื้นผิวด้านในของตัวกลางดูดซับได้ ทำให้ขนาดพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับไม่มีความสัมพันธ์กัน

2.6.6.3 ขนาดและโครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับ

โดยทั่วไปแล้ว การดูดซับมักเกิดขึ้นภายในรูพรุนมากกว่าร้อยละ 90 ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับมวลสารแต่ละชนิดจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอย่างสูง หากเปรียบเทียบมวลสารชนิดเดียวกันแล้ว ตัวกลางดูดซับที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ย่อมมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าตัวกลางดูดซับที่มีขนาดรูพรุนเล็ก เนื่องจากมวลสารสามารถแพร่เข้าสู่ด้านในของตัวกลางดูดซับได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีแม้ขนาดรูพรุนตัวกลางดูดซับใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลมวลสาร แต่ดูดซับมวลสารได้ไม่ดีเนื่องจากตัวกลางดูดซับมีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อน หรือมีการเชื่อมต่อรูพรุนที่มีขนาดหลากหลายและซับซ้อน ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับอาจลดลงได้

2.6.6.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

ลักษณะสมบัติของตัวกลางดูดซับมักเกิดจากชนิดและคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ เช่น ลักษณะทางประจุไฟฟ้า คุณสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ การดูดซับทางเคมี เป็นต้น ซึ่งมีทั้งตัวกลางดูดซับที่หมู่ทางฟังก์ชันที่หลากหลาย และตัวกลางดูดซับที่หมู่ฟังก์ชันเพียงชนิดเดียว โดยส่งผลต่อการคัดเลือกมวลสารและอัตราการดูดซับที่แตกต่างกันไป

2.6.6.5 ลักษณะสมบัติของตัวถูกดูดซับ (มวลสาร)

มวลสารที่เป็นสารอินทรีย์มีความหลากหลายในแง่การดูดซับเป็นอย่างมาก โดยขึ้นกับความสามารถในการแตกตัวเป็นประจุของมวลสาร มวลสารที่แตกตัวเป็นประจุได้ มักไม่สามารถดูดซับได้ ขณะที่มวลสารที่ไม่แตกตัวเป็นประจุ สามารถที่จะดูดซับได้

สำหรับมลสารที่เป็นสารอินทรีย์นั้น ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของมลสารนั้น โดยมลสารที่ไม่ชอบน้ำสูง มักถูกดูดซับได้ดีในตัวกลางดูดซับที่ไม่ชอบน้ำ โดยปกติสมบัติความชอบน้ำของมลสารและหมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพขั้วของมลสาร ในกรณีที่มลสารไม่สามารถแตกตัวได้ แต่ยังคงสามารถละลายน้ำได้ อาจเนื่องมาจากพันธะที่เกิดจากสภาพความเป็นขั้ว เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไดโพล-ไดโพล พันธะไอออน-ไอโพล และอื่นๆ เป็นต้น ขนาดและโครงสร้างโมเลกุลของมลสารอินทรีย์ล้วนมีผลต่อการดูดซับเช่นกัน โดยมลสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่หรือมวลโมเลกุลสูง มักมีแนวโน้มในการดูดซับได้ดีกว่ามลสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหรือมวลโมเลกุลต่ำ ขณะที่โครงสร้างโมเลกุล เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; OH⁻) มักส่งเสริมคุณสมบัติการชอบน้ำของมลสาร ทำให้แนวโน้มในการดูดซับมลสารน้อยลง เป็นต้น นอกจากนี้รูปแบบโครงสร้างของมลสารเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น โครงสร้างแบบวงอะโรมาติก มีแนวโน้มในการดูดซับสูงกว่าโครงสร้างแบบเส้นยาว โครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา ดูดซับได้ดีกว่าโครงสร้างแบบเส้นตรง เป็นต้น

2.6.6.6 ค่าพีเอชของตัวทำละลาย (สารละลาย)

ค่าพีเอชของตัวทำละลายส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับอย่างมาก หมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับและมลสารสามารถแตกตัวเป็นประจุ และถูกไอออนไนซ์ทำให้เกิดการให้และรับโปรตอนได้ เช่น ที่ค่าพีเอชต่ำ หมูอะมิโน ($-NH_2$) รับโปรตอนกลายเป็น ($-NH_3^+$) หรือที่ค่าพีเอชสูง จะให้โปรตอนกลายเป็น (NH^-) เป็นต้น โดยปกติเมื่อมลสารถูกไอออนไนซ์ทั้งในตัวทำละลายและบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ เกิดสภาพประจุทางไฟฟ้าที่เหมือนกัน ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลง อย่างไรก็ตาม มลสารที่แตกตัวเป็นประจุได้อาจถูกดูดซับได้ดีเช่นกัน หากแรงหลักในการดูดซับเป็นแรงดึงดูดระหว่างประจุ

2.6.6.7 ความปั่นป่วน (turbulence)

ความปั่นป่วนมีหน้าที่ทำให้ตัวกลางดูดซับและมลสารสามารถสัมผัสกันได้อย่างทั่วถึง หากความปั่นป่วนต่ำของระบบต่ำ ฟิล์มน้ำที่อยู่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับจะมีความหนาสูง เนื่องจากไม่ได้ถูกรบกวนจากแรงเฉือน ทำให้มลสารเคลื่อนเข้าสู่ตัวกลางดูดซับได้ยาก ขณะที่ระบบที่มีความปั่นป่วนสูง มลสารสามารถเคลื่อนเข้าหาตัวกลางดูดซับได้ง่ายกว่า เนื่องจากแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับได้เลย ดังนั้นในกรณีที่ความปั่นป่วนต่ำอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ และในกรณีที่ความปั่นป่วนสูงอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านรูพรุน

2.6.6.8 สารรบกวน

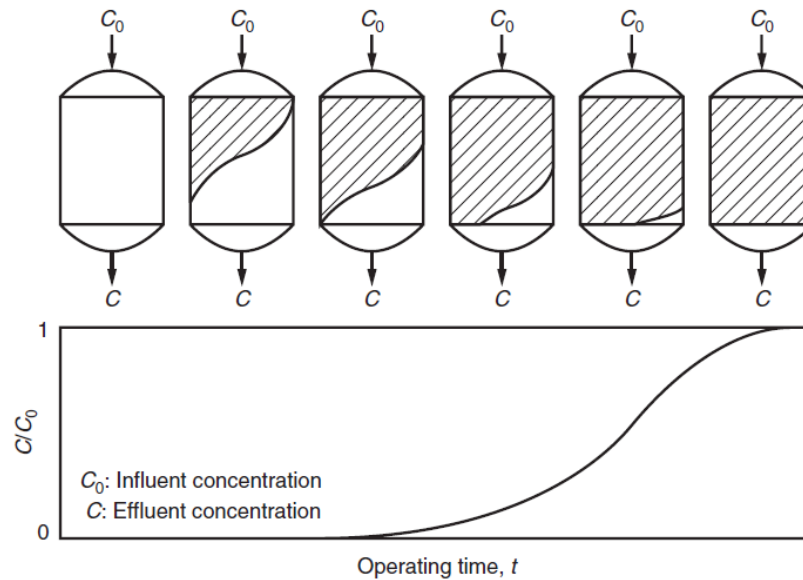
การมีอยู่ของสารรบกวนในระบบ มีทั้งช่วยส่งเสริมและลดความสามารถในการดูดซับ ในกรณี ที่ช่วยส่งเสริมการดูดซับ เช่น การมีอยู่ของเกลืออนินทรีย์ในระบบ เกิดประจุของไอออนที่แตกตัวและ ดูดติดกับมลสารที่มีประจุตรงกันข้ามได้ ทำให้ความเป็นประจุของมลสารลดลง การผลักรันระหว่างมล สารที่อยู่ในตัวทำละลายและมลสารบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับมีความรุนแรงลดลงตามไปด้วย ทำให้การ สะสมตัวของมลสารบนตัวกลางดูดซับเกิดได้มากขึ้น ขณะที่การลดความสามารถในการดูดซับ เช่น การมีมลสารอื่นๆปนเปื้อนอยู่กับมลสารเป้าหมาย ทำให้เกิดการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ ส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารเป้าหมายนั้นๆลดลง

2.6.7 การดูดซับแบบคอลัมน์

ระบบดูดซับแบบคอลัมน์อาศัยการไหลแบบต่อเนื่องผ่านชั้นวัสดุดูดซับที่อยู่กับที่ โดยมี พารามิเตอร์ทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง คือ ขนาดอนุภาค ภาวะบรรทุกทางชลศาสตร์ และการสูญเสีย ของเสดของน้ำในชั้นกรอง (Head loss) ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินความเป็นไปได้ของ คอลัมน์ การเดินระบบแบบคอลัมน์มักกระจายภาระการดูดซับมลสารได้ดีกว่าระบบการดูดซับแบบที่ ละเท โดยวัสดุดูดซับที่อยู่บริเวณทางน้ำเข้าจะสัมผัสกับน้ำที่ปนเปื้อนมลสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เสมอ และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารในแต่ละชั้นวัสดุดูดซับไม่มากนัก ดังนั้นวัสดุดูด ซับในแต่ละชั้น สามารถดูดซับมลสารได้เต็มความสามารถ และความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านการบำบัดมี ความเข้มข้นคงที่ ซึ่งแตกต่างกับการเดินระบบแบบที่ละเทแบบต่อเนื่องที่จะได้ความเข้มข้นไม่คงที่

การเคลื่อนที่ของมลสารเข้าสู่ชั้นวัสดุดูดซับจะเกิดบริเวณถ่ายเทมวลสาร เนื่องจาก ปรากฏการณ์การดูดซับแบบต่อเนื่องของวัสดุดูดซับ มลสารจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วบริเวณด้านบน ของชั้นวัสดุดูดซับ จนกระทั่งชั้นวัสดุดูดซับนั้นสมดุลไปด้วยการดูดซับหรือไม่สามารถดูดซับได้อีก ขณะที่ระดับชั้นวัสดุดูดซับที่อยู่ถัดลงมาที่ยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยยังคงเกิดการดูดซับอยู่อย่าง ต่อเนื่อง ซึ่งบริเวณนี้เองมลสารจะเคลื่อนที่จากวัฏภาคน้ำเข้าสู่พื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยบริเวณชั้น วัสดุดูดซับนี้เรียกว่า โซนถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Zone) ซึ่งช่วงความลึกของโซนถ่ายเทมวล สารขึ้นอยู่กับปัจจัยทางการดูดซับและทางชลศาสตร์หลายประการ เช่น ชนิดของมลสาร ประเภทและ สมบัติของวัสดุดูดซับ เป็นต้น เมื่อทำการวัดความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากระบบคอลัมน์ที่เวลา ต่างๆ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากระบบกับเวลา หรือปริมาตรของ สารละลายที่ผ่านระบบ เรียกความสัมพันธ์ดังกล่าวว่า กราฟเบรคทู (Breakthrough Curve) ซึ่ง ความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากระบบจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงระดับความเข้มข้นของมล สารสูงสุดที่กำหนดไว้ เรียกความเข้มข้นดังกล่าวว่า ความเข้มข้นเบรคทู โดยทั่วไปกราฟเบรคทูจะมี

ลักษณะคล้ายตัว S ซึ่งถ้าหากเส้นกราฟ มีความชันมาก แสดงถึงความสามารถในการแพร่ของมลสาร ผ่านชั้นฟิล์มหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับที่สูง โดยลักษณะของกราฟเบรกทรูแสดงดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 กราฟเบรกทรูและขอบเขตการถ่ายเทมวลในระบบคอลัมน์
(Crittenden และคณะ, 2012)

2.6.7.1 แบบจำลองของโทมัส

แบบจำลองของโทมัส คือ แบบจำลองที่ใช้ทำนายกราฟเบรกทรู (Breakthrough Curve) ของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานของการไหลแบบท่อไหล (Plug flow) ความเร็วการไหลผ่านชั้นวัสดุดูดซับมีค่าคงที่ อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่ จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาเคมีเทียมอันดับสอง และสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.16

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_t q_0 M}{Q} - k_t C_0 t \quad (2.16)$$

โดยที่	C	คือ ความเข้มข้นมลสารในตัวทำละลายในน้ำออกที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_0	คือ ความเข้มข้นมลสารเริ่มต้นในตัวทำละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	k_t	คือ ค่าคงที่ของโทมัส (ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที)
	q_0	คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	M	คือ มวลของวัสดุดูดซับ (กรัม)
	Q	คือ อัตราการไหลของสารละลาย (ลิตรต่อนาที)
	t	คือ เวลา (นาที)

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ กับ t จะได้กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และสามารถหาค่า k_s และ q_0 ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ต่อไปได้

2.6.7.2 สมการของโบฮาร์ทและอดัมส์

โบฮาร์ทและอดัมส์ได้พัฒนาความสัมพันธ์ตามทฤษฎีอัตราปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction rate) ซึ่งสามารถทำนายประสิทธิภาพการดูดซับแบบต่อเนื่องในระบบคอลัมน์ทดลอง โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.17

$$t = \frac{N_0}{C_0 V} \left[D - \frac{V}{KN_0} \ln\left(\frac{C_0}{C_B} - 1\right) \right] \quad (2.17)$$

โดยที่	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้งานในคอลัมน์ (นาที)
	v	คือ ความเร็วในการไหลของน้ำผ่านวัสดุดูดซับ (เซนติเมตรต่อนาที)
	D	คือ ความหนาของชั้นวัสดุดูดซับ (เซนติเมตร)
	K	คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที)
	N_0	คือ ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	C_0	คือ ความเข้มข้นของมลสารที่เข้าสู่คอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_B	คือ ความเข้มข้นเบรคทรู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อให้ $t = 0$ แล้วแทนในสมการที่ 2.17 จะได้สมการที่ 2.18

$$D_0 = \frac{V}{KN_0} \left[\ln\left(\frac{C_0}{C_B} - 1\right) \right] \quad (2.18)$$

โดย D_0 เรียกว่าความลึกวิกฤต (Critical bed depth) ซึ่งเป็นความหนาของชั้นวัสดุดูดซับที่ทำให้ความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากระบบมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเบรคทรู เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ D จะสามารถหาค่า N_0 และ K ได้จากความชัน และจุดตัดแกน x ตามลำดับ โดยค่าคงที่ที่ได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบดูดซับแบบคอลัมน์จริงได้

2.6.7.3 ระยะเวลาที่เก็บในคอลัมน์เปล่า (Empty Bed Contact Time, EBCT)

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการใช้ในการออกแบบ และพัฒนาชุดทดลองคอลัมน์จากขนาดทดลองเป็นขนาดใช้จริง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ

$$EBCT = \frac{\text{ปริมาตรของชั้นวัสดุดูดซับ}}{\text{อัตราการไหลของสารละลาย}} \quad (2.19)$$

$$\text{Usage rate} = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุดูดซับในคอลัมน์}}{\text{ปริมาตรสารละลายที่ผ่านคอลัมน์จนถึงจุดเบรคทูล}} \quad (2.20)$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการอุบัติขึ้นและความเป็นพิษของฟลูออไรด์

Namkaew และ Wiwatanadate (2012) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำสำหรับบริโภคและอาการป่วยเรื้อรังของประชากรที่อาศัยในอำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย โดยเลือกทำการศึกษาตำบลในอำเภอสันกำแพง 2 ตำบล ได้แก่ ตำบลปูกาและตำบลออนใต้ และเลือกกลุ่มตัวอย่างประชากรที่อายุมากกว่า 50 ปี จำนวน 534 คน เก็บข้อมูลโดยการสอบถามแหล่งน้ำที่ใช้บริโภคและอาการป่วยเรื้อรังที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งนำตัวอย่างน้ำที่ใช้บริโภคแต่ละแหล่งมาวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ และนำมาประเมินค่าเฉลี่ยปริมาณฟลูออไรด์ที่ได้รับต่อวันของการบริโภคน้ำ จากการเก็บข้อมูล 655 ตัวอย่างแหล่งน้ำดื่มของกลุ่มประชากรพบว่า ประชากรในพื้นที่ส่วนใหญ่บริโภคแหล่งน้ำผิวดินมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 68.4 ตามด้วยแหล่งน้ำบาดาลร้อยละ 23.7 ซึ่งตัวอย่างน้ำเกือบทั้งหมดไม่ผ่านการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพก่อนนำมาบริโภค เมื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์พบว่า ร้อยละ 53.4 มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ระหว่าง 0 ถึง 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตรคิดเป็นร้อยละ 19.8 และ 26.7 มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ระหว่าง 0.71 ถึง 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และมากกว่า 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยตัวอย่างน้ำบาดาลเกือบทั้งหมดมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์มากกว่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่การประเมินค่าเฉลี่ยปริมาณฟลูออไรด์ที่ได้รับต่อวันของการบริโภคน้ำพบว่า มีค่าระหว่าง 0.0026 ถึง 1.038 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.1503 (SD±0.1743) มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน โดยมีแค่ประชากรในตำบลปูกาเท่านั้นที่ได้รับปริมาณฟลูออไรด์มากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวัน และเมื่อดูอาการป่วยเรื้อรังที่เกิดขึ้นพบว่า ร้อยละ 65.2 มีอาการปวดหลังส่วนล่าง ร้อยละ 60.1 มีอาการปวดเข่า และร้อยละ 37.1 มีอาการปวดขา โดยปริมาณฟลูออไรด์ที่ได้รับต่อวันของการบริโภคน้ำสัมพันธ์กับอาการปวดหลังส่วนล่าง (OR = 5.12, 95% CI, 1.59–16.98) และพื้นที่ทั้งที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์สูงและต่ำสัมพันธ์กับอาการปวดหลังส่วนล่าง (OR = 1.58, 95% CI, 1.10–2.28; OR = 1.22, 95% CI, 1.14–1.31) อย่างไรก็ตามไม่พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออไรด์ที่ได้รับต่อวันของการบริโภคน้ำกับอาการปวดเข่าและขา

Tahir และ Rasheed (2013) ได้ศึกษาปริมาณฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำดื่มของประเทศปากีสถาน และความเสี่ยงที่อาจเกิดโรคทางกระดูก โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 747 ตัวอย่างจากแหล่งน้ำผิวดินและน้ำบาดาลใน 17 เมืองหลักของปากีสถาน มาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณฟลูออไรด์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ร้อยละ 16 ของตัวอย่างน้ำมีระดับความเข้มข้นฟลูออไรด์อยู่

ระหว่าง 1.6 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย โดยเมืองที่มีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์มากที่สุดคือ เมือง Balochistan และ เมือง Punjab แหล่งน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูงมากกว่าร้อยละ 20 คือ แหล่งน้ำบาดาลที่ใช้ปั๊มสูบน้ำชนิดใช้มือ ซึ่งเพิ่มโอกาสในการปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบาดาล โดยสันนิษฐานว่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่มากเกินไปมาจากชั้นหินอุ้มน้ำแคลเซียมคุณภาพต่ำ และอยู่ในพื้นที่ที่พบแร่ธาตุฟลูออไรด์อยู่ทั่วไป หรือพื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกระหว่างโซเดียมกับแคลเซียมที่เกิดขึ้น นอกจากนี้เมื่อดูผลกระทบทางสุขภาพที่เกิดขึ้นพบว่า มีความเสี่ยงในการเกิดโรคทางกระดูกที่เป็นผลจากการได้รับฟลูออไรด์ เนื่องจากมีการตรวจพบปริมาณฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตรใน 16 เมืองหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองที่มีการพบฟลูออไรด์ได้ทั่วไปในแหล่งน้ำบาดาล เช่น เมือง Balochistan และ เมือง Punjab

Chuah และคณะ (2016) ได้ศึกษาอันตรายต่อสุขภาพของฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในแหล่งน้ำดื่มทางเหนือของประเทศไทย โดยทำแผนที่เส้นทางการเคลื่อนที่ของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำของจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาลจำนวน 995 ตัวอย่างจากบ่อน้ำตื้น (ความลึกน้อยกว่า 30 เมตร) และบ่อน้ำลึก (ความลึกมากกว่า 30 เมตร) มาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณฟลูออไรด์ จากการวิเคราะห์พบว่า จังหวัดเชียงใหม่ ตัวอย่างน้ำร้อยละ 31 ของบ่อน้ำตื้น และร้อยละ 18 ของบ่อน้ำลึก และ จังหวัดลำพูน ตัวอย่างน้ำร้อยละ 35 ของบ่อน้ำลึก และร้อยละ 7 ของบ่อน้ำตื้น มีระดับความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่เป็นอันตราย โดยมีความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร การตรวจพบปริมาณฟลูออไรด์ที่สูงในแหล่งน้ำของทั้งสองจังหวัดมีสาเหตุที่แตกต่างกัน จังหวัดเชียงใหม่มีสาเหตุมาจากพื้นที่บริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับเขตความร้อนใต้พิภพ ทำให้น้ำร้อนใต้พิภพที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูงกระจายตัวผ่านพื้นที่ต่างๆตามทิศทางการไหลของน้ำผิวดินและน้ำบาดาล ขณะที่จังหวัดลำพูนเกิดจากพื้นที่บริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับรอยเลื่อนแม่ทา ซึ่งสอดคล้องหลักฐานที่มีอยู่ที่ชี้ให้เห็นว่าทิศทางการไหลของน้ำไม่มีทิศทางตามธรรมชาติ การมีอยู่ของรอยเลื่อนที่ซ่อนตัว ตลอดจนความเป็นไปได้ที่แหล่งกำเนิดของฟลูออไรด์อยู่บริเวณรอยเลื่อน ทั้งนี้การใช้ทรัพยากรแหล่งน้ำบาดาลที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวและความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำของทั้งสองจังหวัดได้ โดยอิทธิพลในการกระจายตัวของฟลูออไรด์เกิดได้ทั้งตามธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ การบริหารจัดการแหล่งน้ำในพื้นที่ทั้งสองจังหวัดให้มีความปลอดภัยสำหรับการบริโภคจึงเป็นความท้าทายของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ขณะเดียวกันความคิดที่ว่าน้ำบาดาลที่อยู่ระดับลึกมีความปลอดภัยและสะอาดอาจไม่ถูกต้องเสมอไป ดังนั้นแหล่งน้ำบาดาลทุกระดับควรมีการตรวจสอบก่อนที่จะก่อสร้างบ่อเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค

Sharma และคณะ (2017) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับฟลูออไรด์ และผลกระทบที่เกิดขึ้น พบว่าการบริโภคแหล่งน้ำที่มีฟลูออไรด์กำลังเป็นปัญหาสำคัญของโลก รายงานจากกระทรวง

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมประเทศอินเดียเปิดเผยว่า ประชากรใน 19 จังหวัดของประเทศอินเดียกำลังเผชิญกับผลกระทบอย่างรุนแรงจากฟลูออไรด์ โดยเมือง Pradesh ประชากรมีการบริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่เมือง Rajasthan ตรวจพบว่า ประชากรเป็นโรคฟลูออโรไลซิส ซึ่งเป็นผลมาจากการบริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ตรวจพบอยู่ระหว่าง 20 ถึง 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลักษณะของพื้นที่ของเมืองที่มีความอุดมสมบูรณ์ของหินแกรนิต แร่ธาตุกลุ่มซีพีโอไลต์ (Sepiolite) และพาลีโกล์สไกต์ (Palygorskite) ประกอบกับการมีเขื่อนกั้นน้ำ และการประทุของภูเขาไฟในพื้นที่ ทำให้ฟลูออไรด์ละลายในแหล่งน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบปัญหาเดียวกันในกลุ่มประเทศแอฟริกา สหรัฐอเมริกา บัลแกเรีย จีน เอธิโอเปีย อิหร่าน เกาหลีใต้ และเม็กซิโก ที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์ ความเข้มข้นสูงในแหล่งน้ำ ขณะที่การมีอยู่ของหินชนิดต่างๆ ทั้งหินอัคนีและหินแปร ตลอดจนการละลายฟลูออไรด์จากแร่ฟลูออไรต์ (Fluorite) โทแพส (Topaz) และอะพาไทต์ (Apatite) เป็นอีกหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการปนเปื้อนฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำในหลายประเทศ เช่น ปากีสถาน ไทย แอฟริกาตะวันตก และแอฟริกาใต้ นอกจากนี้การปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่กล่าวข้างต้นความเป็นพิษของฟลูออไรด์ยังสามารถพบได้ใน ยา อาหาร และผลิตภัณฑ์ต่างๆ อีกด้วย งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า ฟลูออไรด์มีความเป็นพิษทั้งระดับที่ทดลองในสัตว์ (Preclinical level) และระดับที่ทดลองในคน (Clinical level) เป็นสารที่รบกวนการทำงานของสมอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัตว์หรือเด็กที่กำลังเจริญเติบโต และลดประสิทธิภาพของสมอง หรือไอคิว (Intelligence quotient) อีกทั้งการได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายอาจเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งกระดูกในวัยรุ่นเพศชาย ส่งผลให้ประเทศในกลุ่มยุโรปหลายประเทศประกาศห้ามจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ประเภทยาสีฟัน

Zuo และคณะ (2018) ได้รวบรวมข้อมูลความเป็นพิษของฟลูออไรด์ในสิ่งมีชีวิต โดยสรุปความเป็นพิษของฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นใน พืช แมลง มนุษย์และสัตว์เลี้ยง สำหรับความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในพืชพบว่า เมื่อบรรยากาศมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์มากกว่า 2 ไมโครกรัมต่อเดซิเมตรต่อวัน การเจริญเติบโตของพืชจะได้รับผลกระทบ ทำให้ผลผลิตที่ได้ลดลง สีของใบไม้จางลงและแห้ง และสุดท้ายเซลล์ส่วนใหญ่ของพืชจะตายลง สำหรับความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในแมลงพบว่า เมื่อโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) มีความเข้มข้นร้อยละ 0.057 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) จะทำให้ปลวกหยุดกินอาหาร ขณะที่ตัวไหม (Silkworms) ที่กินใบหม่อนซึ่งมีการปนเปื้อนความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 80 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จะทำให้ให้เอนไซม์ที่มีผลต่อกลไกการป้องกันตนเอง (Phenol oxidase) ในตัวไหมลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็น 160 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ส่งผลให้ระบบภูมิคุ้มกันลดลง เซลล์มีการเจริญเติบโตที่ผิดปกติ เซลล์เนื้อเยื่อตาย และสุดท้ายตัวไหมจะตายลง สำหรับความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในมนุษย์และสัตว์เลี้ยงพบว่า การรับประทานฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ต่อวัน จะทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายมากมาย เช่น ฟันตกกระ (Dental fluorosis) เกิดความเสี่ยงที่จะเกิดโรคเบาหวาน (Diabetes) ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ำ (Decreased immunity) เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (Cardiovascular disease) ลดประสิทธิภาพการทำงานของสมอง (Intelligence) มีปัญหาเกี่ยวกับการสืบพันธุ์ (Decreased fertility) และความเสี่ยงที่อาจเกิดโรคชนิดอื่น ๆ ได้ เมื่อความเข้มข้นของฟลูออไรด์เพิ่มสูงขึ้น

2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติในการกำจัดฟลูออไรด์

Parmar และคณะ (2006) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำ โดยใช้ซังข้าวโพดแบบผงเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุเริ่มจากบดซังข้าวโพดให้เป็นผงขนาด 0.25 ถึง 0.40 มิลลิเมตร แล้วนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายของอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุที่ได้จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ก่อนนำเข้าสู่ตูบที่อุณหภูมิ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส เรียกว่าวัสดุดูดซับที่ได้ว่า Al-CCP จากนั้นทำขั้นตอนเดิมข้างต้นซ้ำแต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เรียกว่าวัสดุดูดซับที่ได้ว่า Ca-CCP ทั้งนี้ 1 กรัมของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดมีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมและแคลเซียม 0.193 และ 0.35 กรัม ตามลำดับ จากการศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับที่ได้พบว่า วัสดุดังกล่าวมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนร้อยละ 44.66 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.04 และไนโตรเจนร้อยละ 0.2 โดยตรวจพบการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันกลุ่มไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลในวัสดุที่ได้ จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟลูออไรด์คือ 5.0 ถึง 6.5 โดยปริมาณวัสดุดูดซับชนิด Al-CCP และ Ca-CCP ที่ 20 กรัมต่อลิตร ในสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 และระยะเวลาการสัมผัส 120 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์คิดเป็นร้อยละ 88.13 และ 95.17 ตามลำดับ โดยไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุทั้งสองสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ขณะที่ข้อมูลอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์จะลดลง เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มสูงขึ้น จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ซังข้าวโพดสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำได้ โดยวัสดุดูดซับชนิด Ca-CCP มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ดีกว่าวัสดุดูดซับชนิด Al-CCP

R Bhaumik และคณะ (2012) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากสารละลายโดยใช้ผงเปลือกไข่เป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับเริ่มจากล้างทำความสะอาดเปลือกไข่ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำเข้าสู่ตูบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เปลือกไข่ที่ได้จะถูกบดให้มีขนาดเล็กกลง แล้วใช้ตะแกรงมาตรฐานคัดเลือกขนาดต่างๆ จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการ

ดูดซับฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ซึ่งความสามารถดูดซับสูงสุดในช่วงค่าพีเอช 2 ถึง 6 โดยไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) บนพื้นผิววัสดุดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ความสามารถดูดซับชั้นเดียวสูงสุดอยู่ที่ 1.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) ขณะที่จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy, E_a) ตามสมการอาร์เรเนียสเท่ากับ 45.98 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่าฟลูออไรด์ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับด้วยการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) สำหรับข้อมูลอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ สามารถเกิดขึ้นได้เองและเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) เมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปทดสอบกับแหล่งน้ำบาดาลที่ปนเปื้อนฟลูออไรด์พบว่าสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้จนเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าหลักการดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ที่สูง ต้นทุนในการดำเนินการต่ำ และวัสดุดูดซับหาง่าย เนื่องจากเปลือกไข่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นตามปกติในครัวเรือน

Yadav และคณะ (2013) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากสารละลายและน้ำบาดาลโดยใช้ฟางข้าวสาลี ชี้อ้อย และชานอ้อยเป็นวัสดุดูดซับ โดยมีขั้นตอนการเตรียมวัสดุแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน สำหรับฟางข้าวสาลีและชี้อ้อย เริ่มจากการนำวัสดุทั้งสองไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปบดให้ได้เป็นผง วัสดุที่บดเป็นผงแล้วจะถูกเติมฟอรั่มลิตีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 (วัสดุต่อฟอรั่มลิตีไฮด์, น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อยับยั้งสีและสารละลายน้ำที่มีอยู่ในวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งอาจจะละลายออกมาได้ จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดสารฟอรั่มลิตีไฮด์ที่ยังตกค้างอยู่ แล้วจึงนำเข้าตูบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สุดท้ายทำการคัดขนาดวัสดุดูดซับที่ต้องการโดยใช้ตะแกรงขนาด 20 ถึง 50 mesh ASTM ขณะที่การเตรียมชานอ้อย เริ่มด้วยการล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง ชานอ้อยที่แห้งแล้วจะถูกนำไปผสมกับกรดซัลฟิวริก แล้วให้ความร้อนด้วยตูบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุที่ได้จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง แล้วนำไปแช่ทิ้งไว้ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 1 คืน เพื่อกำจัดกรดที่ตกค้าง จากนั้นนำไปเข้าตูบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สุดท้ายทำการคัดขนาดวัสดุดูดซับที่ต้องการโดยใช้ตะแกรงขนาด 20 ถึง 50 mesh ASTM จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า วัสดุดูดซับจากฟางข้าว ชี้อ้อย และชานอ้อยที่ปริมาณ 4 กรัมต่อลิตร ในสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 40.2 49.8 และ 56.4 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาดที่สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 57.6 โดยไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง

สามชนิด สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบพหุนาม (R² ≥ 0.89) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของวัสดุ ดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order model) และกลไกการกำจัดฟลูออไรด์บนผิวตัวกลางดูดซับเกิดขึ้นอย่างซับซ้อน โดยการดูดซับบนพื้นผิวรวมทั้งการแพร่ในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าที่สุด (Rate-determining step) ขณะที่การมีอยู่ของไอออนชนิดต่างๆในน้ำบาดาล ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดเป็นวัสดุที่คัดเลือกในการดูดซับฟลูออไรด์ จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสามชนิดสามารถใช้แทนถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาดได้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ที่ใกล้เคียงกัน และสามารถลดค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้อวัสดุดูดซับได้

Shivayogimath, Hiremath และ Lokeshappa (2014) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำโดยใช้ซังข้าวโพดเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับเริ่มจากการนำซังข้าวโพดมาบดให้เหลือขนาด 0.7 ถึง 1.2 มิลลิเมตร ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดฝุ่นหรือสิ่งสกปรกต่างๆ แล้วจึงทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำลงไปกวนผสมในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัสดุที่ได้จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชเป็นกลาง แล้วอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัสดุที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว จะถูกนำไปผสมกวนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชเป็นกลาง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับที่ได้พบว่า วัสดุดังกล่าวมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนร้อยละ 44 ไฮโดรเจนร้อยละ 7 ออกซิเจนร้อยละ 47 และไนโตรเจนร้อยละ 0.4 โดยวัสดุดูดซับที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดเท่ากับ 940 ตารางเมตรต่อกรัม และร้อยละ 81 ตามลำดับ จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า วัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงถึงร้อยละ 81 โดยมีไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบพหุนาม (R² > 0.947) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ซังข้าวโพดซึ่งเป็นของเสียทางการเกษตรสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำได้

Kashi และคณะ (2015) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากแหล่งน้ำดื่มโดยใช้ผงเปลือกไข่เป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับเริ่มจากล้างทำความสะอาดเปลือกไข่ แล้วนำไปต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังหลงเหลืออยู่ เปลือกไข่ที่ได้จะถูกบดให้มีขนาดเล็กกลง และใช้ตะแกรงมาตรฐานคัดเลือกขนาด 0.25 ถึง 0.104 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) เพื่อกำจัดอนุภาคต่างๆที่เหลืออยู่ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุ

ดังกล่าวพบว่า ผงเปลือกไข่ที่ได้มีความหนาแน่น 1.148 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 7.43 ตารางเมตรต่อกรัม ค่า pH_{zpc} เท่ากับ 8.2 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณวัสดุดูดซับที่แตกต่างกันพบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ระยะเวลาการสัมผัสที่ 60 นาที และปริมาณวัสดุดูดซับที่ 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุด โดยเมื่อค่าพีเอชสูงกว่าค่า pH_{zpc} ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์จะลดลงเนื่องจากแรงผลัทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) ระหว่างผิววัสดุดูดซับและฟลูออไรด์ไอออนในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่าค่า pH_{zpc} ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์จะเพิ่มสูงขึ้นขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์จะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นมากกว่าระยะเวลาสมดุลในการดูดซับ และการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวดูดซับฟลูออไรด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุดูดซับ ทำให้ค่าพีเอชสารละลายเพิ่มสูงขึ้น โดยกลไกการดูดซับเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างอนุมูลอิสระของคาร์บอเนตและฟลูออไรด์ไอออน และไอโซเทอมการดูดซับเป็นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 > 0.99$) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผงเปลือกไข่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ และเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา

Lupo และคณะ (2015) ได้พัฒนาหลักการในระดับครัวเรือนสำหรับการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนฟลูออไรด์สูง โดยใช้เปลือกไข่เป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับเริ่มจากการนำเปลือกไข่ที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด จากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า เปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการเผามีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ 37.4 ± 1.2 มิลลิกรัมฟลูออไรด์ต่อกิโลกรัม ขณะที่เปลือกไข่ธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์เพียง 6.6 ± 0.8 มิลลิกรัมฟลูออไรด์ต่อกิโลกรัม ระยะเวลาที่ต้องการในการดูดซับฟลูออไรด์ร้อยละ 50 คือ 0.52 ± 0.12 นาที ซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้กับงานจริง และความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของเปลือกไข่สูงกว่าวัสดุดูดซับจากธรรมชาติและของเสียอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆ โดยความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปลือกไข่มีขนาดเล็กลง โดยเปลือกไข่ที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงสุด คือ เปลือกไข่ขนาดบางพิเศษ รองลงมาคือ เปลือกไข่ขนาดบาง และเปลือกไข่ขนาดหนา โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 125 ± 289 313 ± 946 และ $441 \pm 1,836$ ไมโครตรามเมตร ตามลำดับ น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะมีสภาพเป็นด่างและตกตะกอนในรูปของแคลเซียมฟลูออไรด์ ทำให้ต้องปรับให้มีสภาพเป็นกลางโดยการอัดอากาศหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง โดยน้ำก่อนการปรับสภาพให้เป็นกลางมีค่าพีเอชสูงถึง 11.9 ± 0.06 เมื่อผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลางแล้วค่าพีเอชจะลดลงเหลือ 7.22 ± 0.68 นอกจากนี้ยังส่งผล

กระทบต่อค่าความนำไฟฟ้าของน้ำก่อนและหลังปรับสภาพให้เป็นกลางโดยมีค่าลดลงจาก 2.45 ± 1.20 เป็น 0.25 ± 0.07 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ขณะที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เฉลี่ยก่อนกระบวนการบำบัดและหลังการปรับสภาพให้เป็นกลางมีค่าเท่ากับ 5.03 ± 0.09 และ 2.76 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วไม่มีความแตกต่างกับน้ำประปาทั้งทางด้านสี กลิ่น และรสชาติ จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถประยุกต์ใช้โดยบุคคลทั่วไปได้ เนื่องจากต้นทุนต่ำและปลอดภัยเป็นของเสียที่เกิดขึ้นตามปกติในครัวเรือน

Ria Bhaumik และ Mondal (2015) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากสารละลาย โดยใช้กาบมะพร้าวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสภาพโดยความร้อนหรือสารเคมีเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับเริ่มจากการนำกาบมะพร้าวที่ได้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกจะถูกนำไปบดและเลือกขนาดวัสดุที่ 250 ไมโครเมตร เรียกว่าวัสดุที่ชื่อว่า CFD - 1 ส่วนที่สองจะถูกนำไปแช่ในสารละลายฟอสมัลดีไฮด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 120 ถึง 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชที่ได้เป็นกลางแล้วจึงทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และนำไปบดและเลือกขนาดวัสดุที่ 250 ไมโครเมตร เรียกว่าวัสดุที่ชื่อว่า CFD - 2 ส่วนที่สามสุดท้ายจะถูกแช่ในสารละลายแคลเซียมที่สกัดจากเปลือกไข่ในอัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุที่ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชที่ได้เป็นกลาง และดำเนินการตามขั้นตอนเดิม เรียกว่าวัสดุที่ชื่อว่า CFD - 3 เมื่อศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุทั้ง 3 ชนิดพบว่า วัสดุชนิด CFD - 2 มีพื้นที่ผิวมากที่สุดคิดเป็น 824.3 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมาคือ CFD - 3 และ CFD - 1 คิดเป็น 804.5 และ 285.6 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยตรวจพบการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันกลุ่มไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลในวัสดุที่ได้ ขณะที่ค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุรวมเป็นศูนย์ (Zero point of charge, pH_{zpc}) ของวัสดุชนิด CFD - 1 CFD - 2 และ CFD - 3 มีค่าเท่ากับ 6.1 6.6 และ 7.1 ตามลำดับ โดยไอโซเทอมการดูดซับ สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 > 0.96$) และความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 12.66 25.64 และ 38.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ขณะที่จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order model) สำหรับข้อมูลจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ สามารถเกิดขึ้นได้เองและเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุดังกล่าว ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นหลักการที่เหมาะสม เพื่อใช้สำหรับการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำต่อไปได้

Ria Bhaumik และ Mondal (2016) ได้ศึกษาการดูดซับของฟลูออไรด์จากน้ำโดยใช้เปลือกกล้วยแบบผงเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับ เริ่มจากการนำเปลือกกล้วยที่ได้มาล้าง

ด้วยน้ำประปา ตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุที่ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้วิธีการปรับปรุงสภาพวัสดุดูดซับที่แตกต่างกัน ส่วนแรกจะนำวัสดุที่ได้มาตัดและบด แล้วกรองเพื่อให้ได้ขนาด 250 ไมโครเมตร โดยใช้ชื่อเรียกว่าวัสดุดูดซับที่ BPD-1 ส่วนที่สอง จะนำวัสดุมากระตุ้นด้วยสารละลาย HCHO ความเข้มข้นร้อยละ 1 แล้วนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 120 ถึง 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วัสดุที่ได้จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง จนกระทั่งค่าพีเอชเป็นกลาง ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำมาบดให้ละเอียด จากนั้นทำการกรองเพื่อให้ได้ขนาด 250 ไมโครเมตร โดยใช้ชื่อเรียกว่าวัสดุดูดซับที่ BPD-2 วัสดุที่ได้จะถูกนำไปแช่ในสารละลายแคลเซียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ที่สกัดจากเปลือกไข่ ในอัตราส่วน 2 มิลลิกรัมของสารละลายต่อน้ำหนักของ BPD-2 ตามด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี วัสดุที่ได้จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง จนกระทั่งค่าพีเอชเป็นกลาง ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำมาบดให้ละเอียด จากนั้นทำการกรองเพื่อให้ได้ขนาด 250 ไมโครเมตร โดยใช้ชื่อเรียกว่าวัสดุดูดซับที่ BPD-3 เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดที่ได้พบว่า องค์ประกอบคาร์บอนวัสดุ BPD-2 สูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีลีล้า ขณะที่วัสดุ BPD-2 และ BPD-3 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าวัสดุ BPD-1 แสดงให้เห็นว่าวัสดุดังกล่าวมีผนังรูพรุนที่ไม่เรียบ และมีการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิววัสดุ ทำให้การดูดซับฟลูออไรด์บนพื้นผิวของวัสดุ BPD-3 และ BPD-2 มากกว่าวัสดุ BPD-1 จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ พบว่า ความสามารถในการดูดซับของวัสดุ BPD-1 BPD-2 และ BPD-3 มีค่าเท่ากับ 17.43, 26.31 และ 39.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ปริมาณวัสดุดูดซับที่ 1 กรัมต่อลิตร ในสารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 69.4 81.3 และ 82.6 ตามลำดับ โดยไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดังกล่าวสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และข้อมูลจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order model) นอกจากนี้แล้วเมื่อนำวัสดุดูดซับกลับมาฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีการคายซับฟลูออไรด์โดยการเพิ่มค่าพีเอชพบว่า วัสดุทั้งสามชนิดมีความสามารถในการคายซับฟลูออไรด์ได้สูง จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับที่ทำมาจากของเสียทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ ทำให้สามารถนำวัสดุดังกล่าวมาพัฒนาในเชิงพาณิชย์ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับในอนาคตต่อไปได้

Goswami และ Kumar (2017) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำโดยใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบขนาดนาโนเมตรเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับ เริ่มจากการนำแกลบไปเผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จนกระทั่งกลายเป็นถ่าน และนำไปบดให้ได้ละเอียดจนได้ขนาดระดับนาโนเมตร เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของวัสดุดูดซับที่ได้พบว่า มีปริมาณสารระเหย (Volatile matter) สูง และ ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบ

ของวัสดุดูดซับที่ได้กับถ่านชีวภาพจากวัสดุอื่นๆพบว่า วัสดุดูดซับที่ได้มีองค์ประกอบของคาร์บอน ออกซิเจนและซีลีเนียม แต่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและไฮโดรเจนต่ำ จากการศึกษาประสิทธิภาพ ในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า เมื่อปริมาณวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์จะ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปริมาณวัสดุดูดซับที่ 1 กรัมต่อลิตร ในสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ สูงที่สุดถึงร้อยละ 90 ขณะที่วัสดุดูดซับขนาดปกติ สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้เพียงร้อยละ 77.2 ไอโซ เทอสมการดูดซับของวัสดุดังกล่าวสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.995$) และไอโซเทอม แบบฟรุนดลิช ($R^2 = 0.991$) แสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ตลอดจนการดูดซับของฟลูออไรด์บนผิววัสดุดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โดย ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมทั้งสองมีค่าเท่ากับ 12.6 และ 21.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่ามีความสามารถในการดูดซับที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพจากวัสดุอื่นๆ ขณะที่ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง เสมือน (pseudo-second-order model) จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าแถบซึ่งเป็น ของเสียจากการเกษตร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการกำจัดฟลูออไรด์ในสารละลาย เอเคลียสได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า

Tirkey, Bhattacharya และ Chakraborty (2018) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดฟลูออไรด์ที่ เหมาะสมจากน้ำโดยใช้ไบหว่า เป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับ เริ่มจากการนำไบหว่า มาล้างด้วยน้ำประปาประมาณ 2 ถึง 3 ครั้ง ตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้งประมาณ 3 ถึง 4 วัน แล้วจึงนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไบหว่าที่ได้จะถูกนำไป บดให้ละเอียดจนมีขนาดประมาณ 200 ไมโครเมตร แล้วทำให้เป็นซีลีเนียมโดยการนำเข้าเตาเผาที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สุดท้ายทำการคัดเลือกขนาดซีลีเนียมที่น้อยกว่าหรือ เท่ากับ 106 ไมโครเมตร โดยน้ำหนักแห้งของไบหว่า 1 กรัม สามารถผลิตเป็นซีลีเนียมได้ประมาณ 0.07 กรัม เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของวัสดุดูดซับที่ได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น EDS FT-IR TGA และ XRD พบว่า วัสดุดูดซับที่ได้มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมออกไซด์ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า ความสามารถในการ ดูดซับของวัสดุมีค่าเท่ากับ 4.56 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณวัสดุดูดซับที่ 6.5 กรัมต่อลิตร ในสารละลาย ฟลูออไรด์ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 และระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 77.8 โดยไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดังกล่าวสอดคล้องกับไอโซ เทอมแบบฟรุนดลิช ($R^2 = 0.774$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของฟลูออไรด์บนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็น แบบหลายชั้น (Multiple layer) ขณะที่ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุดังกล่าวพบว่า สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order model) และ

แบบจำลองการแพร่กระจายภายในสารดูดซับ (intraparticle diffusion model) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับชั้นฟิล์มของเหลวที่ล้อมรอบผิววัสดุดูดซับ (Boundary layer) และการแพร่ของฟลูออไรด์ในรูพรุนของวัสดุดูดซับ เมื่อนำวัสดุดูดซับชนิดดังกล่าวไปทดสอบกับน้ำบาดาลจริงที่มีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับ การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างสารที่มีขั้วต่างกัน (electrostatic interaction) และการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ (Anion exchanges) เช่น ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าของเสียทางชีวภาพ สามารถทำเป็นวัสดุดูดซับที่มี ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ได้ โดยใช้วิธีในการทำวัสดุที่ง่าย สะดวก ไม่ซับซ้อน และราคาถูก ทำให้พื้นที่ชนบทที่ห่างไกล สามารถทำวัสดุดูดซับ เพื่อใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำได้เอง

Babu และคณะ (2018) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำปนเปื้อนโดยใช้กากกาแฟเป็น วัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับ เริ่มจากการนำกากกาแฟมาบดให้ละเอียด และคัดเลือก ขนาดที่ต้องการโดยใช้ตะแกรงขนาด 200 ASTM จากนั้นนำวัสดุที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดสิ่ง แปรกปลอมอื่นๆ ที่ไม่ต้องการแล้วทำให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส วัสดุที่ได้จะถูก เติมกรด HCl แล้วนำไปต้มบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเพิ่ม พื้นที่ดูดซับของวัสดุ จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง เพื่อกำจัดกรด HCl ที่หลงเหลืออยู่ แล้วทิ้ง ไว้ให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพของวัสดุดูดซับที่ได้พบว่า องค์ประกอบทางเคมีที่มีมากที่สุด 3 อันดับแรกในวัสดุดูดซับ คือ K_2O P_2O_5 และ CaO คิดเป็นร้อยละ 28.77 23.60 และ 14.45 ตามลำดับ จากการศึกษา ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า ปริมาณวัสดุดูดซับที่ 2 กรัมต่อลิตร ในสารละลาย ฟลูออไรด์ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และระยะเวลาการสัมผัส 105 นาที มี ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Max adsorption capacity) เท่ากับ 9.05 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อนำ วัสดุดูดซับที่ได้ไปทดสอบกับตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์พบว่า มีประสิทธิภาพในการ กำจัดฟลูออไรด์ได้มากกว่าร้อยละ 89 โดยไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดังกล่าวสอดคล้องกับไอโซ เทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 > 0.998$) แสดงให้เห็นว่าฟลูออไรด์ดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) บน พื้นผิววัสดุดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ขณะที่ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไป ตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order model) นอกจากนี้แล้วเมื่อ ทดสอบการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับก่อนนำกลับมาใช้งานใหม่พบว่า สามารถใช้งานแล้วนำมาฟื้นฟู สภาพได้ประมาณ 5 ครั้ง โดยที่ความสามารถในการดูดซับของวัสดุลดลงเพียงเล็กน้อย จากข้อมูลที กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับชนิดดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัด ฟลูออไรด์ได้ทั้งในน้ำที่มีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์ได้

Talat และคณะ (2018) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำด้วยระบบดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้กัมมะพร้าวเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับเริ่มจากการล้างทำความสะอาดกัมมะพร้าวด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ จากนั้นนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.9 เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยให้อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที วัสดุที่ได้จะถูกบดให้ละเอียดและผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ชนิดเกล็ดในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และเผาวัสดุที่ได้อีกครั้งด้วยเงื่อนไขเดิม จากการศึกษาพบว่า วัสดุดูดซับที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 1,448 ตารางเมตรต่อกรัม โดยประสิทธิภาพการดูดซับของคอลัมน์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อชั้นวัสดุดูดซับความหนาเพิ่มขึ้นหรือความเข้มข้นของฟลูออไรด์เพิ่มมากขึ้น และลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดเท่ากับ 6.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อัตราการไหล 1.66 มิลลิลิตรต่อนาที และความหนาของชั้นวัสดุดูดซับ 15 เซนติเมตร ขณะที่การหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินระบบและความหนาของชั้นวัสดุดูดซับหรือการหาเบรคทรู จะใช้แบบจำลอง Bed Depth Service Time (BDST) Thomas และ Yoon-Nelson เมื่อศึกษาการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับดังกล่าวพบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 มีประสิทธิภาพในการชะล้างสูงถึงร้อยละ 97 วัสดุดูดซับที่ได้จะถูกนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีก 3 ครั้ง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของวัสดุดูดซับ ซึ่งชั้นวัสดุดูดซับมีความสามารถในการใช้งานได้ 8.3 รอบ และหมดความสามารถในการใช้งานเมื่อถูกใช้งานไปแล้ว 9 รอบ

2.7.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ถ่านกระดูกเป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดฟลูออไรด์

Rojas-Mayorga และคณะ (2013) ได้ศึกษาสภาวะไฟโรโรซิสที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกระดูกสำหรับการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำ โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการดูดซับของถ่านกระดูกที่เงื่อนไขสภาวะไฟโรโรซิสที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิในสภาวะไฟโรโรซิสเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสังเคราะห์ถ่านกระดูกให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ โดยกระดูกที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ระยะเวลาการเผา 2 ชั่วโมง จะมีพื้นที่ผิว 110 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.233 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดคือ 7.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่ถ่านกระดูกที่เผาด้วยอุณหภูมิมากกว่า 700 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยา dihydroxylation ของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในถ่านกระดูก ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ลดลง โดยไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และข้อมูลอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ แสดงให้เห็น

ว่าการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยวัสดุดังกล่าวเกิดขึ้นได้เองและเป็นกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic process) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นถึงสภาวะไฟโรโรซิสที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ถ่านกระดุกให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุด

NA Medellin-Castillo และคณะ (2014) ได้ศึกษาความสามารถการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุกในน้ำ รวมถึงบทบาทของปริมาณสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ กลไกของการดูดซับ และการแข่งขันของไอออนลบชนิดอื่นๆ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่าพีเอชของสารละลายลดลงจากค่าพีเอชเท่ากับ 7 จนเหลือค่าพีเอชเท่ากับ 5 ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยความแตกต่างของค่าพีเอชในกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์บนถ่านกระดุก แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของไฮดรอกซิลไอออน บนสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ และฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายไม่ได้เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในการดูดซับฟลูออไรด์ในสารละลาย เกิดจากการละลายของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์และแคลเซียมคาร์บอเนตในถ่านกระดุก และปฏิกิริยาที่รับโปรตอน (Protonation) และที่แตกตัวให้โปรตอน (Deprotonation) บริเวณตำแหน่งที่ทำงาน (Active site) ของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในถ่านกระดุก นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อยู่ภายในถ่านกระดุกเป็นหลัก โดยการมีอยู่ของไอออนลบชนิดอื่นๆ เช่น คลอไรด์ (Cl^-) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO_3^-) แลโนไตรท์ (NO_2^-) ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ โดยกลไกการดูดซับเป็นแรงดึงดูดระหว่างสารที่มีขั้วต่างกันระหว่างพื้นผิวของถ่านกระดุกและฟลูออไรด์ไอออนในสารละลาย

Mutchimadilok และคณะ (2014) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกที่ผลิตขึ้นภายในครัวเรือน ซึ่งใช้กระบวนการผลิตถ่านกระดุกที่ไม่ยุ่งยากและราคาถูก โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองแบบทีละเท (Batch test) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุก และการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test) เพื่อออกแบบกระบวนการกรองสำหรับใช้กำจัดฟลูออไรด์ในครัวเรือน โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ให้ต่ำกว่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษากลไกการดูดซับแบบจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมพบว่าการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ถ่านกระดุกดังกล่าว จะเข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยระยะเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง โดยการดูดซับฟลูออไรด์บนถ่านกระดุกสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช ขณะที่การมีอยู่ของไอออนลบในน้ำชนิดอื่นๆ เช่น คลอไรด์ (Cl^-) ไนเตรต (NO_3^-) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุก การศึกษาการดูดซับผ่านกระบอกกรองด้วยน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ที่อัตราการไหล 15 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ความสัมพันธ์ของอายุการใช้งานและความสูงของถ่านกระดุก เมื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ด้วยสมการ Bohart – Adams พบว่าความหนาชั้นวัสดุดูดซับที่น้อยที่สุดที่สามารถกำจัดฟลูออไรด์จนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.7 มิลลิกรัม

ต่อลิตร คือ 11.16 เซนติเมตร และเมื่อนำมาใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ปนเปื้อนฟลูออไรด์ความเข้มข้น 3.31 ถึง 3.45 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้กระบอกกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 เซนติเมตร ความสูง 30 และ 50 เซนติเมตร พบว่า สามารถกรองน้ำให้มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ต่ำกว่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ปริมาณ 140 และ 400 ลิตร ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าหลักการดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดฟลูออไรด์ในระดับครัวเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Sawangjang (2015) ได้ศึกษาหลักการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ถ่านกระดุกหมู ถ่านกระดุกไก่ และถ่านกระดุกวัวเป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุเริ่มจากการทำความสะอาดกระดุกด้วยการกำจัดไขมันและเนื้อสัตว์ที่ติดบนกระดุกออก แล้วจึงล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อยู่บนกระดุก โดยกระดุกที่ได้จะถูกทุบให้มีขนาดเล็กกลง แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่แตกต่างกัน โดยแบ่งอุณหภูมิออกเป็น 3 ช่วง คือ 450 550 และ 650 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 3 ช่วง คือ 1 2 และ 3 ชั่วโมง จากผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค XRD และ BET พบว่า ถ่านกระดุกหมูและถ่านกระดุกไก่ที่ได้จากการเผาด้วยอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 92.8 และ 85.3 ตามลำดับ ขณะที่ถ่านกระดุกวัวที่ได้จากการเผาด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 63.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านกระดุกหมูมีองค์ประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์มากที่สุด อย่างไรก็ตามจากการทดลอง BET พบว่า ถ่านกระดุกวัวมีพื้นที่ผิวมากที่สุดคิดเป็น 103.11 ตารางเมตรต่อกรัม ขณะที่ถ่านกระดุกหมูและถ่านกระดุกไก่มีพื้นที่ผิวคิดเป็นร้อยละ 83.79 และ 62.80 ตามลำดับ โดยค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุรวมเป็นศูนย์ (Zero point of charge, pH_{zpc}) ของถ่านกระดุกหมู ถ่านกระดุกไก่ และถ่านกระดุกวัวเท่ากับ 8.6 9.0 และ 7.9 ตามลำดับ จากการศึกษาหลักการดูดซับแบบจลนพลศาสตร์และไอโซเทอม พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ถ่านกระดุกทั้ง 3 ชนิด จะเข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยระยะเวลาสัมผัสมากกว่า 3 ชั่วโมง จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง โดยการดูดซับฟลูออไรด์บนถ่านกระดุกเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวตามไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ขณะที่ความสามารถการดูดซับฟลูออไรด์ที่สูงที่สุดของถ่านกระดุกหมู ถ่านกระดุกไก่ และถ่านกระดุกวัวมีค่าเท่ากับ 0.449 0.337 และ 0.527 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แม้ว่าถ่านกระดุกวัวจะมีองค์ประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์น้อยที่สุด แต่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ไม่ได้ขึ้นกับองค์ประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกระดุกด้วย นอกจากนี้เมื่อศึกษาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมที่ปลดปล่อยออกจากถ่านกระดุกทั้ง 3 ชนิดในน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำที่แช่ด้วยถ่านกระดุกวัว และเมื่อเพิ่ม

ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมจะเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟลูออไรด์ไอออนจะถูกกำจัด ขณะที่สารอินทรีย์อื่นๆจะถูกปลดปล่อยออกมาในน้ำที่ผ่านการบำบัดแทน ขณะที่การศึกษาผลกระทบของค่าพีเอชและไอออนลบในสารละลายพบว่า ค่าพีเอชที่สูงกว่า pH_{zpc} ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากประจุบนพื้นผิวของถ่านกระดูกที่เป็นลบ ประกอบกับการมีอยู่ของไอออนลบที่อยู่ในน้ำ การคายซับของฟลูออไรด์ไอออนที่ถูกดูดซับบนถ่านกระดูกจะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชในน้ำมีค่ามากกว่า 11 ดังนั้นกลไกในการกำจัดฟลูออไรด์ที่สำคัญ คือ แรงดึงดูดระหว่างสารที่มีขั้วต่างกันระหว่างพื้นผิวของถ่านกระดูกและฟลูออไรด์ไอออน

Ismail และ AbdelKareem (2015) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำโดยใช้กระดูกแกะและกระดูกไก่เป็นวัสดุดูดซับ โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุเริ่มจากการทำความสะอาดกระดูกด้วยการกำจัดเนื้อสัตว์ที่หลงเหลืออยู่ และล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปต้มในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไขมัน โดยทำกระบวนการข้างต้นซ้ำทั้งหมด 4 ครั้ง แล้วจึงนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง กระดูกที่ได้จะถูกทุบให้มีขนาดเล็ก โดยแบ่งออกเป็น 4 ขนาดคือ ขนาดละเอียด (<0.075 มิลลิเมตร) ขนาดเล็ก (0.075 ถึง 0.30 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (0.30 ถึง 1.18 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (1.18 ถึง 2.34 เมตร) จากผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค XRF XRD และ BET พบว่า องค์ประกอบหลักในกระดูกทั้งสองชนิดคือ สารแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) โดยกระดูกไก่และกระดูกแกะขนาดละเอียดมีพื้นที่ผิวมากที่สุดคิดเป็น 10.7 และ 4.0 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้พื้นที่ผิวของกระดูกทั้งสองชนิดจะลดลง เมื่อขนาดของกระดูกใหญ่ขึ้น จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์พบว่า กระดูกไก่และกระดูกแกะที่ขนาดละเอียดปริมาณ 15 และ 20 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ในสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และระยะเวลาการสัมผัส 120 นาที ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดอยู่ที่ 0.665 และ 0.482 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ได้สูงถึงร้อยละ 99.8 และ 99.4 ตามลำดับ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับของกระดูกทั้งสองชนิดสอดคล้องทั้งไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 \geq 0.91$) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order model) และกลไกที่สำคัญในการกำจัดฟลูออไรด์คือ การตกตะกอนทางเคมีและการแลกเปลี่ยนไอออน โดยความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการมีอยู่ของไอออนลบชนิดอื่น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อการจัดฟลูออไรด์

2.7.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการกระตุ้นวัสดุดูดซับด้วยสารเคมี

Park และคณะ (2000) ได้ศึกษาหลักการเกลือหลอมเหลวสำหรับการสังเคราะห์วัสดุซีโอไลต์ และลักษณะของวัสดุซีโอไลต์ที่ได้ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ ซีโอโลออย โดยใช้หลักการสังเคราะห์ 2 แบบ คือ หลักการเกลือหลอมเหลว (Molten-salt) และ หลักการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) สำหรับหลักการเกลือหลอมเหลวจะเป็นการนำซีโอโลออยผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไนเตรทหรือโพแทสเซียมไนเตรทในอัตราส่วน 0.7 ต่อ 0.3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ขณะที่หลักการไฮโดรเทอร์มอลจะเป็นการนำซีโอโลออยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง วัสดุที่ได้จากหลักการทั้งสองจะถูกล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลายครั้ง ก่อนทิ้งไว้ตลอดคืนในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาวัสดุซีโอไลต์ที่ได้พบว่า กระบวนการสังเคราะห์ด้วยหลักการเกลือหลอมเหลวจะมีการสูญเสียแร่ธาตุต่างๆน้อย โดยร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักของปฏิกิริยา ซึ่งหลักการเกลือหลอมเหลวมีค่าสูงกว่าหลักการไฮโดรเทอร์มอล 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ได้จากหลักการไฮโดรเทอร์มอลพบว่า วัสดุซีโอไลต์จากหลักการเกลือหลอมเหลวจะมีองค์ประกอบของโลหะกลุ่มอัลคาไลน์และพื้นที่ผิวของวัสดุมากกว่า แต่ค่าพีเอชและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกต่ำกว่า (อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมิเนียมสูง) อย่างไรก็ตามการเข้าไปแทนที่ของเกลือในรูพรุนของวัสดุซีโอไลต์ยังสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความแห้งในกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้วัสดุซีโอไลต์ที่ได้จากหลักการเกลือหลอมเหลวมีความแตกต่างกับหลักการไฮโดรเทอร์มอล

Shang และคณะ (2015) ได้ศึกษาการเพิ่มพื้นที่ผิววัสดุคาร์บอนรูพรุนจากชีวมวลโดยกระบวนการเผาในเกลือหลอมเหลว ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ เปลือกถั่วลิสงและซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ทั้งนี้กระบวนการเผาและกระบวนการกระตุ้นวัสดุดังกล่าวจะถูกทำในขั้นตอนเดียวกัน โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุเริ่มจากล้างทำความสะอาด อบให้แห้ง และนำไปบดจนได้ขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปผสมกับเกลือในอัตราส่วนเปลือกถั่วลิสงต่อซิงค์คลอไรด์ 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก แล้วจึงนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ตามด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 นาที วัสดุที่ได้จะถูกล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลายครั้ง จนกระทั่งไม่มีคอลลิเจนตกค้างอยู่ เมื่อนำวัสดุดูดซับที่ได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีพบว่า มีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิดบนพื้นผิว พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,642 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.42 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยวัสดุชนิดเดียวกันที่ผ่านกระบวนการเผาเพียงอย่างเดียวจะมีพื้นที่ผิว 95.51 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งการใช้หลักการเกลือหลอมเหลวร่วมกับกระบวนการเผาจะทำให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในวัสดุถูกสกัดออกมา และเกิดการแพร่ของเกลือเข้าไปในรูพรุนของวัสดุ ทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลบลูในสารละลาย

พบว่า วัสดุที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงเมทริลบลูสูงถึง 876.35 มิลลิกรัมต่อกรัม จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นกระบวนการเผาในเกลือหลอมเหลวสามารถลดระยะเวลาและอุณหภูมิในการเผาผลาญได้ และวัสดุดูดซับที่ได้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ได้วัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพ

Wang และคณะ (2018) ได้ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนพื้นที่ผิวสูงจากเปลือกกล้วยโดยกระบวนการเผาพร้อมกับเกลือซิเตรท โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ เปลือกกล้วยและเกลือซิเตรทชนิดต่างๆ โดยเปลือกกล้วยจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นคาร์บอนและเกลือซิเตรทจะถูกใช้เพื่อเพิ่มพื้นที่รูพรุน โดยขั้นตอนการเตรียมวัสดุเริ่มจากการล้างทำความสะอาด อบให้แห้ง และนำไปบดจนได้ขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำวัสดุที่ได้และโพแทสเซียมซิเตรตผสมลงในน้ำที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากทำให้แห้ง แล้วนำวัสดุที่ได้เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงล้างด้วยกรดไฮดรอกลอลริกและน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งค่าพีเอชที่ได้เป็นกลาง เรียกว่าวัสดุที่ได้ว่า K-PC ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำแต่เปลี่ยนชนิดเกลือซิเตรตเป็นแมกนีเซียมซิเตรต เรียกว่าวัสดุที่ได้ว่า Mg-PC และเรียกว่าวัสดุที่ไม่มีการผสมเกลือซิเตรตว่า PC จากผลการศึกษาพบว่า กระบวนการเผาพร้อมกับเกลือซิเตรท ทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิม PC ที่มีพื้นที่ผิวเพียง 98 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 1,691 และ 2,159 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับ K-PC และ Mg-PC ตามลำดับ โดยรูปแบบโครงสร้างรูพรุนของวัสดุที่ได้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของเกลืออินทรีย์กลุ่มอัลคาไลน์และไมโซอัลคาไลน์ในระหว่างกระบวนการเผา วัสดุที่ได้จะประกอบด้วยอนุภาคอินทรีย์จำนวนมากในโครงข่ายคาร์บอน เช่น โพแทสเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นไม่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นก็ทำหน้าที่เป็นรูปแบบภายในของการก่อตัวคาร์บอนรูพรุนขนาดต่างๆ โดยจะถูกกำจัดออกด้วยการล้างกรด ทำให้ได้วัสดุคาร์บอนรูพรุนขนาดเมโซพอร์และพอร์สพอร์ตามที่ต้องการ

2.7.5 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุ

ดูดซับ

Matilainen, Vieno และ Tuhkanen (2006) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำเสียจริง โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับ โดยทำการทดลองด้วยระบบกรองช้า ซึ่งมีพื้นที่ผิวขนาด 30 ตารางเมตร และความลึก 115 เซนติเมตร จากผลการศึกษาพบว่า กระบวนการกรองด้วยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดเฉพาะสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (1,000 ถึง 4,000 กรัมต่อโมล) เท่านั้น โดยไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และขนาดเล็กได้ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำคิดเป็นร้อยละ 27 ถึง 36 ของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนและตกตะกอนแล้ว อย่างไรก็ตามปริมาณสารอินทรีย์

ละลายน้ำโมเลกุลขนาดเล็กอาจเพิ่มสูงขึ้นได้หลังกระบวนการบำบัดดังกล่าว ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในชั้นกรอง

Gibert และคณะ (2013) ได้ศึกษาสัดส่วนและการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยระบบกรองถ่านกัมมันต์ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มแบบเต็มรูปแบบ โดยทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 2 ชนิดคือ GAC-A (ทำมาจากถ่านหินปิทูมินัส) และ GAC-B (ทำมาจากถ่านพีต) เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการวิเคราะห์หาสัดส่วนของสารอินทรีย์ธรรมชาติตามมวลโมเลกุล สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค High performance size exclusion chromatography (HPSEC) โดยแบ่งสารอินทรีย์ที่ได้ตามมวลโมเลกุลจากสูงไปต่ำคือ พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymers, BP) สารฮิวมิก (Humic substance, HS) ผลผลิตจากกรดฮิวมิก (Building blocks, BB) และสารอินทรีย์มวลโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight organics, LMW) ซึ่งมีมวลโมเลกุลประมาณ 20,000 1,000 300 ถึง 500 และ 350 กรัมต่อโมล ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำถึงกลาง เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon) จะลดลงจากช่วงเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพร้อยละ 65 เป็นร้อยละ 40 สำหรับ GAC-A และร้อยละ 20 สำหรับ GAC-B ในช่วงท้ายของการทดลอง ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมจะถูกกำจัดผ่านกระบวนการดูดซับ โดยสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (BB และ LMW) ถึงกลาง (HS) จะถูกกำจัดได้มาก เนื่องจากสามารถแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนของวัสดุดูดซับได้ และเมื่อเวลาผ่านไปกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพก็จะมีส่วนสำคัญในการกำจัดปริมาณคาร์บอนอินทรีย์เช่นกัน โดยสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำยังคงถูกกำจัดออกไป เนื่องจากมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพสูง

Sountharajah และคณะ (2016) ได้ศึกษาการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำฝน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเป็นวัสดุดูดซับ โดยทำการศึกษาดูด้วยระบบดูดซับแบบคอลัมน์ที่มีความสูงชั้นกรอง 100 เซนติเมตร อัตราการเร็วการกรอง 5 เมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาในการเดินระบบ 2 ชั่วโมง และน้ำฝนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำเริ่มต้น 5.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่า น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นลดลงเหลือ 0 ถึง 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำคิดเป็นร้อยละ 98 ขณะที่ความสูงของชั้นกรองเดียวกันและอัตราเร็วในการกรองเหมือนกัน น้ำฝนจริงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำคิดเป็นร้อยละ 83 โดยกลไกในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำเป็นการดูดซับทางเคมีด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์

ตารางที่ 2-2 สรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติในการกำจัดฟลูออไรด์

วัสดุดิบ	วิธีการปรับปรุงสภาพ	ลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุ	F _i (mg/l)	Eff. (%)	pH	ปริมาณวัสดุ (g/l)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	TOC (mgC/l)	อ้างอิง
ซีเลอีย ฟางข้าวสาเลี และซานอ้อย	สารเคมี	-	5	49.8 40.2 และ 56.4	6	4	1.73 1.93 และ 1.15	-	Yadav และคณะ (2013)
เปลือกกล้วย	สารเคมี	- pH _{ZPC} เท่ากับ 8.2 - มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิล	10	82.6	6	1	39.5	-	Bhaumik และ Mondal (2014)
ใบหว่า	การเผา	- พื้นที่ผิว 34.33 m ² /g - pH _{ZPC} เท่ากับ 8.2 - มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิล - มี CaCO ₃ CaO และ CaOH เป็นองค์ประกอบหลัก	6	77.8	6.5	6.5	4.56	-	Tirkey, Bhattacharya และ Chakraborty (2017)
แกลบ	การเผา	- มี C O Ca และ Si เป็นองค์ประกอบหลัก	5	90	7	1	12.6	-	Goswami และ Kumar (2017)
กากกาแฟ	สารเคมี	- พื้นที่ผิว 302.43 m ² /g - มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิล - มี K ₂ O P ₂ O ₅ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก	20	89	4	2	9.05	-	Babu และคณะ (2018)
เปลือกไข่	-	- พื้นที่ผิว 21.2 m ² /g - pH _{ZPC} เท่ากับ 6.3 - มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มไฮดรอกซิล	-	-	6	24	1.09	-	Bhaumik และคณะ (2012)
เปลือกไข่	สารเคมี	- พื้นที่ผิว 7.43 m ² /g - pH _{ZPC} เท่ากับ 8.2	6	100	6	20	-	-	Kashi และคณะ

วัตถุดิบ	วิธีการปรับปรุงสภาพ	ลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุ	F _i (mg/L)	Eff. (%)	pH	ปริมาณวัสดุ (g/L)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	TOC (mgC/L)	อ้างอิง
		- มี CaCO ₃ เป็นองค์ประกอบหลัก							(2015)
เปลือกไข่	การเผา	-	1.9	-	-	-	0.0374	-	Lupo และคณะ (2015)
ซังข้าวโพด	สารเคมี	- มี C H และ N ร้อยละ 44.66 6.04 และ 0.2 ตามลำดับ - มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิล	10	95.2	6.5	20	-	-	Parmar และคณะ (2006)
ซังข้าวโพด	สารเคมีและการเผา	- พื้นที่ผิว 940 m ² /g - มี C H O และ N ร้อยละ 44 7 47 และ 0.4 ตามลำดับ	-	81	-	-	-	-	Shivayogi math, Hiremath และ Lokeshappa (2014)
กากมะพร้าว	สารเคมี	- พื้นที่ผิว 804.5 m ² /g - pH _{ZPC} เท่ากับ 7.1 - มีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิล	-	-	-	-	38.46	-	Bhaumik และ Mondal (2015)
กากมะพร้าว	สารเคมีและการเผา	- พื้นที่ผิว 1,448 m ² /g - ปริมาตรรูพรุน 0.44 cm ³	10	-	5	1.4	6.5	-	Talat และคณะ (2018)
ถ่านกระดุก	การเผา	- พื้นที่ผิว 110 m ² /g - ปริมาตรรูพรุน 0.233 cm ³ /g - มี Ca P และ O ร้อยละ 40.57 18.16 และ	-	-	7	-	7.32	-	Mayorga และคณะ (2013)

วัตถุดิบ	วิธีการปรับปรุงสภาพ	ลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุ	F _i (mg/L)	Eff. (%)	pH	ปริมาณวัสดุ (g/L)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	TOC (mgC/L)	อ้างอิง
		31.12 ตามลำดับ - มีโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์							
ถ่านกระดูก	-	- พื้นที่ผิว 104 m ² /g - pH _{ZPC} เท่ากับ 8.4 - ปริมาตรรูพรุน 0.30 cm ³ /g - มีโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์	-	-	7	-	5.44	-	Medellin-Castillo และคณะ (2014)
ถ่านกระดูกหมู ถ่านกระดูกไก่ และถ่านกระดูกวัว	การเผา	- พื้นที่ผิว 83.79 62.80 และ 103.11 m ² /g ตามลำดับ - pH _{ZPC} เท่ากับ 8.6 9.0 และ 7.9 ตามลำดับ - ปริมาตรรูพรุน 0.3490 0.3288 และ 0.3353 cm ³ /g ตามลำดับ	12.137 12.195 และ 12.937	78.2 64.4 และ 84.4	-	-	0.474 0.390 และ 0.542 ตามลำดับ	7.094 6.456 และ 17.64 ตามลำดับ (ในน้ำเสียจริง)	เบญญาภาสว่างแจ้ง (2558)
กระดูกแกะ และ กระดูกไก่	การเผา	- พื้นที่ผิว 4.0 และ 10.7 m ² /g - ปริมาตรรูพรุน 0.0042 และ 0.0075 cm ³ /g - มีโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์	10	99.4 และ 99.8	7 – 7.2	15 และ 20 ตามลำดับ	0.482 และ 0.665	-	Ismail และ AbdelKar eem (2015)

2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เศษวัสดุจากธรรมชาติเมื่อนำมาปรับปรุงสภาพ โดยผ่านกระบวนการเผาหรือการใช้สารเคมี จะได้วัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ โดยลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับส่วนใหญ่ที่ได้จะมีองค์ประกอบของแคลเซียม และหมู่ฟังก์ชันของกลุ่มคาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิล โดยวัสดุดูดซับ 3 ชนิดแรกที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ แกลบมะพร้าว ชังข้าวโพด และถ่านกระดุก ตามลำดับ ขณะที่วัสดุ 3 ชนิดแรกที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดคือ เปลือกกล้วย กาบมะพร้าว และแกลบ ตามลำดับ ซึ่งวัสดุดูดซับข้างต้นต่างก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์มากกว่าร้อยละ 70 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการเลือกวัสดุดูดซับสำหรับการใช้งานจริงพบว่า ถ่านกระดุกเป็นวัสดุดูดซับที่มีความเป็นไปได้สูงสุด เนื่องจากมีกระบวนการสังเคราะห์วัสดุที่ง่าย ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูง ทำให้ถ่านกระดุกมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานมากที่สุด แม้ว่าถ่านกระดุกที่ผ่านกระบวนการเผาเพียงอย่างเดียวจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ที่ดีอยู่แล้ว แต่การกระตุ้นถ่านกระดุกด้วยสารเคมี อาจเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ได้ เนื่องจากงานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนด้วยวิธีดังกล่าวรวมกับกระบวนการเผา สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุดูดซับลดระยะเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการเผาได้ อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านกระดุกเป็นวัสดุดูดซับยังมีข้อจำกัดเรื่องการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดุก ซึ่งปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำของถ่านกระดุกที่ออกมาจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของกระดุกสัตว์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการเพิ่มวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำลงไปในชั้นกรองด้วย โดยถ่านกัมมันต์เป็นหนึ่งในวัสดุดูดซับที่น่าสนใจ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่มีมวลโมเลกุลต่ำถึงปานกลางได้ดี ดังนั้นการประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับทั้งสองชนิดรวมกันจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1) สารละลายมาตรฐานรวมไอออนลบ	IC	AccuStandard
2) สารละลายสแตนดาร์ดรีเอเจนต์	Analytical	Hach
3) กรดไฮโดรคลอริก 37 %	Analytical	Qrec
4) กรดไฮโดรโบรมิก	Analytical	Ajax
5) กรดซัลฟิวริก	Analytical	Qrec
6) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 28 %	Analytical	Qrec
7) แอมโมเนียมคลอไรด์	Laboratory	Kemaus
8) แอมโมเนียมเพอร์ฟิวเรต	Analytical	LOBA
9) แคลเซียมคาร์บอเนต	Analytical	Ajax
10) แมกนีเซียมซัลเฟต	Analytical	Ajax
11) เมทิลลอเรนจ์	Analytical	Ajax
12) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต	Analytical	Merck
13) โพแทสเซียมโบรไมด์	Analytical	Ajax
14) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	Analytical	Merck
15) โซเดียมไฮดรอกไซด์	Analytical	Fisher
16) โซเดียมคลอไรด์	Analytical	Fisher
17) โซเดียมฟลูออไรด์	Analytical	Kemaus
18) โซเดียมคาร์บอเนต	Analytical	Ajax
19) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต	Analytical	Ajax
20) เอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (อีดีทีเอ)	Analytical	Ajax
21) อิริโครมแบล็คที	Analytical	PanReac
22) บัฟเฟอร์พีเอช 4 7 และ 10	Laboratory	Ajax
23) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (4-12 mesh)	Laboratory	Sigma Aldrich
24) น้ำปราศจากไอออน		

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

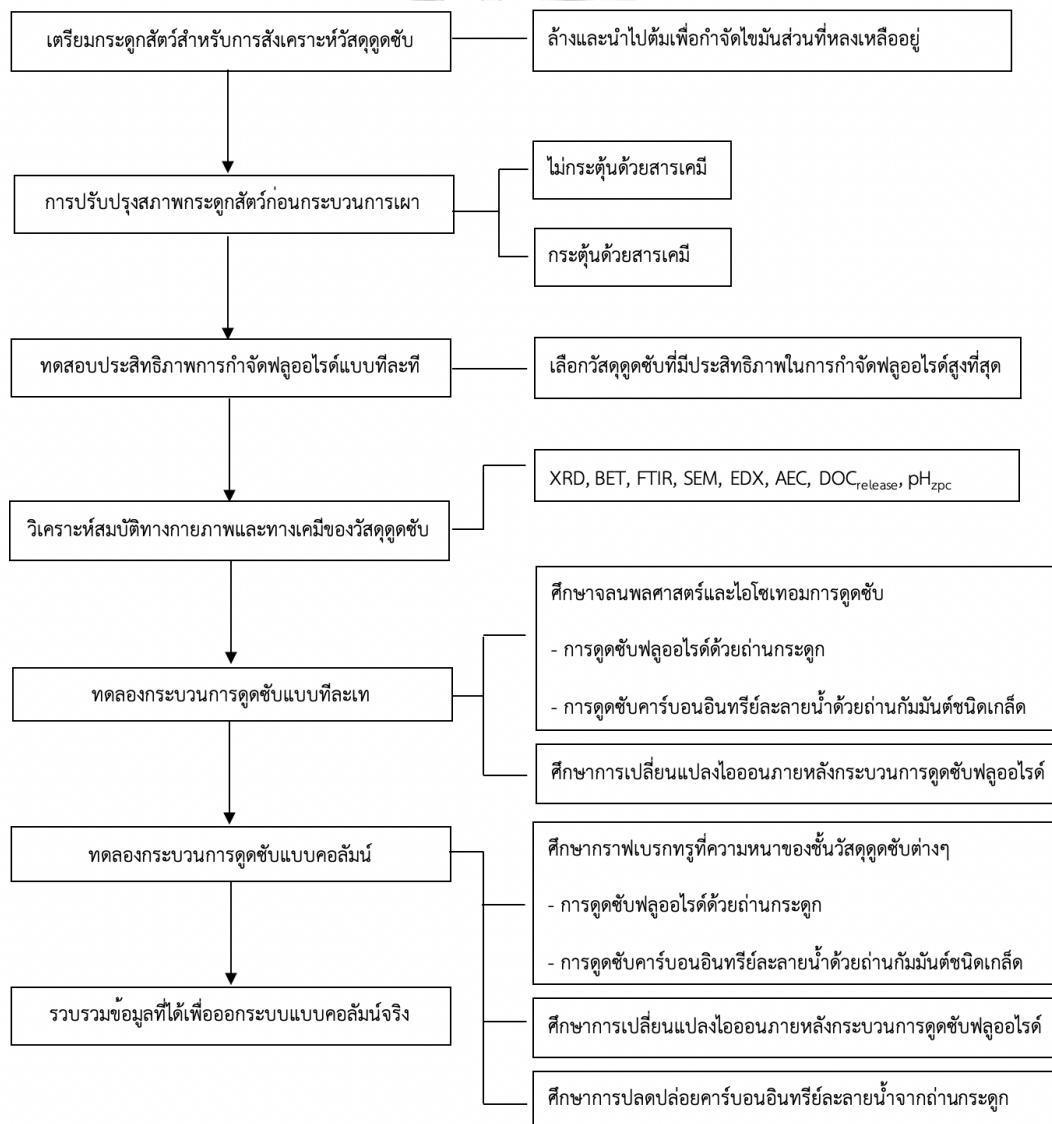
- 1) เครื่อง Ion chromatography (IC)

- 2) เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)
- 3) เครื่อง Total Organic Carbon Analyzer (TOC)
- 4) เครื่อง DR-900 Portable Colorimeter
- 5) เครื่อง Atomic absorption spectroscopy
- 6) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)
- 7) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 8) เครื่องเขย่า
- 9) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 10) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 11) บีกูญญากาศ
- 12) ตู้อบ
- 13) ตู้ดูดควัน
- 14) เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 15) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 16) เครื่องแก้วที่จำเป็น
- 17) ชุดกรองแบบสุญญากาศ
- 18) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve Shaker)
- 19) ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 18 และ 20 Mesh
- 20) ไมโครปิเปต (Micropipette)
- 21) ถ้วยเซรามิกแบบมีฝาปิด
- 22) กระดาษกรอง GF/F (ขนาด 0.7 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร)
- 23) กระดาษกรองชนิดไนลอน (ขนาด 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร)
- 24) กระบอกฉีดยาขนาด 5 มิลลิลิตร
- 25) ไซริงค์ฟิลเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร)
- 26) ไมโครปิเปตทิป (Micropipette Tip)
- 27) ชุดคอลัมน์ทดลอง

3.2 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากนำกระดูกสัตว์ที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ กระดูกสัตว์ที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีและกระดูกสัตว์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี จากนั้นนำกระดูกสัตว์ทั้งสองส่วนเข้าสู่

ผ่านกระบวนการเผา แล้วจึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกทั้งสองชนิดที่ได้ เพื่อเลือกวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเป็นวัสดุดูดซับหลักในการทดลอง และเริ่มการทดลองโดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับ การทดลองกระบวนการดูดซับทั้งแบบที่ละเทและแบบคอลัมน์ โดยศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับและการเปลี่ยนแปลงไอออนภายหลังกระบวนการดูดซับแบบที่ละเท แล้วจึงศึกษากราฟเบรคทรูที่ความหนาของชั้นวัสดุดูดซับต่างๆ การเปลี่ยนแปลงไอออนภายหลังกระบวนการดูดซับ และการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำแบบคอลัมน์ นอกจากนี้ยังศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) จากถ่านกระดูกด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) อีกด้วย โดยศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบที่ละเท และกราฟเบรคทรูที่ความหนาของชั้นวัสดุดูดซับต่างๆแบบคอลัมน์ เมื่อได้ผลการศึกษาทั้งหมดแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบระบบคอลัมน์สำหรับใช้งานจริงต่อไป



รูปที่ 3-1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ

3.2.1.1 การสังเคราะห์ถ่านกระดูก (Sawangjang, 2015)

- 1) ล้างทำความสะอาดกระดูกที่ได้ด้วยน้ำกลั่น และนำไปต้มในน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งน้ำที่ต้มไม่มีไขมันหลงเหลืออยู่
- 2) นำกระดูกที่ได้เข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) ทบกระดูกที่ได้ด้วยค้อนจนมีขนาดประมาณ 1 ถึง 2 นิ้ว จากนั้นใส่ลงในถ้วยเซรามิก ที่มีฝาปิด
- 4) นำถ้วยเซรามิกเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- 5) คัดขนาดถ่านกระดูกด้วยเครื่องเยาะตะแกรงร่อน โดยเลือกขนาดถ่านกระดูกที่อยู่ ระหว่างตะแกรงเบอร์ 18 กับ 12 Mesh
- 6) ล้างถ่านกระดูกด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งความเข้มข้น DOC น้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร
- 7) อบถ่านกระดูกอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บในโถดูดความชื้น

3.2.1.2 การสังเคราะห์ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี (Iriarte-Velasco และ

คณะ, 2014)

- 1) ล้างทำความสะอาดกระดูกที่ได้ด้วยน้ำกลั่น และนำไปต้มในน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งน้ำที่ต้มไม่มีไขมันหลงเหลืออยู่
- 2) นำกระดูกที่ได้เข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) ทบกระดูกที่ได้ด้วยค้อนจนมีขนาดประมาณ 1 ถึง 2 นิ้ว จากนั้นนำกระดูกไปแช่ใน สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายผสม ระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนกระดูกต่อสารละลาย 5 กรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร
- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใช้ตะแกรงกรองสารละลายที่ได้ เพื่อแยกเอาเฉพาะกระดูก
- 5) นำกระดูกใส่ถ้วยเซรามิกเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- 6) ล้างถ่านกระดูกด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งความเข้มข้น DOC น้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร และค่าพีเอชที่ได้ต้องไม่แตกต่างหรือแตกต่างเพียง เล็กน้อย เมื่อเทียบกับน้ำปราศจากไอออนเริ่มต้นที่ใช้

- 7) อบถ่านกระดูกอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บในโถดูดความชื้น

3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของวัสดุดูดซับ

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของวัสดุดูดซับที่ได้ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
โครงสร้างผลึก	X-Ray Diffractometer (XRD)
พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	N ₂ adsorption isotherm using BET theory
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscopy (SEM)
ปริมาณธาตุบนพื้นผิว	Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)
ประจุบนพื้นผิว	Acid-Base Titration
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ	Ion chromatography (IC)
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ	Total Organic Carbon Analyzer

3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

นำวัสดุดูดซับที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น SmartLab ยี่ห้อ Rigaku โดยใช้ Cu K α radiation (40 kV, 30 mA, $2\theta = 10$ ถึง 80 องศา และ อัตราการวิเคราะห์ 2 องศาต่อนาที)

3.2.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

นำวัสดุดูดซับที่ได้มาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน โดยใช้สมการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ในการวิเคราะห์ขนาดและปริมาตรรูพรุน และสมการของ Brunner-Eller-Teller (BET) ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

3.2.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

นำวัสดุดูดซับที่ได้มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR) วิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคป ในช่วงสเปกตรัม 400 – 4,000 เซนติเมตร⁻¹

3.2.2.4 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุดูดซับ

นำวัสดุดูดซับที่ได้มาทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้กำลังขยาย 20,000 และ 50,000 เท่า

3.2.2.5 การศึกษาค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุมเป็นศูนย์ (Point of zero charge) (Asgari และคณะ, 2017)

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารละลายไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยเตรียมด้วยน้ำปราศจากไอออน
- 2) ปรับค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้อยู่ในช่วง 2 ถึง 12 ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCL) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3) นำวัสดุดูดซับปริมาณ 0.2 กรัม ใส่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ปรับค่าพีเอชแล้ว ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่าพีเอชที่ได้ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปกับค่าพีเอชสุดท้าย เพื่อหาค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุมเป็นศูนย์ของวัสดุดูดซับ

3.2.2.6 การศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของวัสดุดูดซับ (Anion Exchange Capacity, AEC) (Lawrinenko และ Laird, 2015)

- 1) เตรียมสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ สารละลายไฮโดรโบรมิกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยเตรียมด้วยน้ำปราศจากไอออน
- 2) ปรับค่าพีเอชของน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าเท่ากับ 4.6 และ 8 ด้วยสารละลายไฮโดรโบรมิก (HBr) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3) นำวัสดุดูดซับปริมาณ 2 กรัม ใส่ลงในน้ำปราศจากไอออนที่ปรับค่าพีเอชแล้ว ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 4) เติมสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ 2 มิลลิลิตร ลงในขวดตัวอย่าง จากนั้นไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
- 5) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองในลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร และล้างวัสดุดูดซับจนกระทั่งค่าความนำไฟฟ้าน้อยกว่า 5 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

- 6) นำวัสดุดูดซับกลับมาใส่ลงในน้ำปราศจากไอออนที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเติมแคลเซียมคลอไรด์ 2 มิลลิลิตร จากนั้นไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
- 7) นำน้ำตัวอย่างที่ได้เจือจางในขวดปรับปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร จากนั้นนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรอง 10 มิลลิลิตร เจือจางในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรอีกครั้ง
- 8) วัดความเข้มข้นของโบรไมด์ที่หลงเหลือในสารละลาย ด้วยเครื่อง Ion chromatography แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบกับค่าพีเอช

3.2.2.7 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

นำวัสดุดูดซับมาศึกษาทั้งจลนพลศาสตร์การคายซับ DOC และความสามารถในการคายซับ DOC โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

การศึกษาจลนพลศาสตร์การคายซับ DOC มีวิธีดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 2 ลิตร ใส่ลงในขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร
- 2) วัดความเข้มข้น DOC เริ่มต้นของน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในการทดลอง
- 3) ใส่วัสดุดูดซับที่ 2 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำปราศจากไอออนที่เตรียมไว้
- 4) นำขวดตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นน้ำเก็บตัวอย่างที่เวลา 6 8 45 60 และ 180 นาที ตามลำดับ หรือเก็บตัวอย่างจนกระทั่งความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง
- 5) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น DOC ที่หลงเหลืออยู่ โดยค่าที่ได้ต้องนำไปลบกับความเข้มข้น DOC เริ่มต้นของน้ำปราศจากไอออน

การศึกษาความสามารถในการคายซับ DOC มีวิธีดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมวัสดุดูดซับที่ 2 6 8 10 15 และ 20 กรัมต่อลิตร
- 2) วัดความเข้มข้น DOC เริ่มต้นของน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในการทดลอง
- 3) ใส่วัสดุดูดซับลงไปใต้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 4) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่ภาวะสมดุลตามเวลาที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์คายซับ

- 5) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น DOC ที่หลงเหลืออยู่ โดยค่าที่ได้ต้องนำไปลบกับความเข้มข้น DOC เริ่มต้นของน้ำปราศจากไอออน

3.2.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท

3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาลจริง

นำน้ำบาดาลจริงมาวิเคราะห์ความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่มีอยู่ จากนั้นเตรียมสารละลายฟลูออไรด์มาตรฐานที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำปราศจากไอออน แล้วนำน้ำบาดาลจริงผสมกับสารละลายฟลูออไรด์มาตรฐานจนกระทั่งได้ความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ต้องการตั้งแต่ 1 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการตรวจสอบความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ได้อีกครั้ง ก่อนนำไปใช้ในการศึกษากระบวนการดูดซับ

3.2.3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

นำถ่านกระดูกปริมาณ 200 กรัม ใส่ลงในน้ำปราศจากไอออน 1000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเข้าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำน้ำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์ความเข้มข้น DOC ที่มีอยู่ โดยน้ำ DOC ที่ได้จะเป็นน้ำที่มีความเข้มข้นสูง และเจือจางในน้ำปราศจากไอออนจนได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 1 ถึง 10 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร โดยทำการตรวจสอบความเข้มข้น DOC ที่ได้ก่อน นำไปใช้ในการศึกษากระบวนการดูดซับอีกครั้ง

3.2.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี (BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH) ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) นำสารละลายฟลูออไรด์มาตรฐานที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางในน้ำปราศจากไอออนจนได้ความเข้มข้นฟลูออไรด์ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าพีเอชของสารละลายที่ได้
- 2) ใส่วัสดุดูดซับที่ 2 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 3) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศา เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่หลงเหลืออยู่
- 5) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนชนิดวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 3-2 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
ตัวแปรต้น	- ชนิดของวัสดุดูดซับ	- ถ่านกระดูกธรรมชาติและถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี
ตัวแปรตาม	- ความเข้มข้นฟลูออไรด์ สุดท้าย	-
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิ - ปริมาณวัสดุดูดซับ - ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น - จำนวนรอบในการปั่นกวน - เวลา	- 25±2 องศาเซลเซียส - 2 กรัมต่อลิตร - 2 มิลลิกรัมต่อลิตร - 200 รอบต่อนาที - 1 ชั่วโมง

3.2.3.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของฟลูออไรด์

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) เตรียมน้ำบาดาลจริงซึ่งมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้น 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2000 มิลลิลิตร วัดค่าพีเอชน้ำบาดาลจริงที่ใช้
- 2) ใส่วัสดุดูดซับที่ 2 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำตัวอย่าง
- 3) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25±2 องศาเซลเซียส จากนั้นน้ำเก็บตัวอย่างที่เวลา 2 4 6 8 10 30 45 60 90 120 240 300 และ 360 นาที ตามลำดับ หรือเก็บตัวอย่างจนกระทั่งความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง
- 4) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่หลงเหลืออยู่
- 5) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนชนิดวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของฟลูออไรด์

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
ตัวแปรต้น	- เวลา - ชนิดของวัสดุดูดซับ	- 2 4 6 8 10 30 45 60 90 120 240 300 และ 360 นาที หรือเก็บตัวอย่างจนกระทั่งความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง - ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
		และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
ตัวแปรตาม	- ความเข้มข้นฟลูออไรด์สุดท้าย	-
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิ	- 25±2 องศาเซลเซียส
	- ปริมาณวัสดุดูดซับ	- 2 กรัมต่อลิตร
	- ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น	- 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร
	- จำนวนรอบในการปั่นกวาน	- 200 รอบต่อนาที

3.2.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเป็นวัสดุดูดซับ ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) นำสารละลาย DOC ที่มีความเข้มข้นสูง เจือจางในน้ำปราศจากไอออนจนได้ความ DOC เริ่มต้น 6 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร วัดค่าพีเอชของสารละลายที่ได้
- 2) ใส่วัสดุดูดซับที่ 5 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำตัวอย่างปริมาตร 2000 มิลลิลิตร
- 3) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25±2 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 2 4 6 8 10 15 20 25 30 60 90 120 180 และ 300 นาที ตามลำดับ หรือเก็บตัวอย่างจนกระทั่งความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง
- 4) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองในลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น DOC ที่ได้

ตารางที่ 3-4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
ตัวแปรต้น	- เวลา	- 2 4 6 8 10 15 20 25 30 60 90 120 180 และ 300 นาที หรือเก็บตัวอย่างจนกระทั่งความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง
ตัวแปรตาม	- ความเข้มข้น DOC สุดท้าย	-
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิ	- 25±2 องศาเซลเซียส
	- ชนิดวัสดุดูดซับ	- ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
	- ปริมาณวัสดุดูดซับ	- 5 กรัมต่อลิตร
	- ความเข้มข้น DOC เริ่มต้น	- 6 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
	- จำนวนรอบในการปั่นกวน	- 200 รอบต่อนาที

3.2.3.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) นำน้ำบาดาลจริงมาปรับความเข้มข้นฟลูออไรด์ให้เป็น 2 4 6 8 10 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าพีเอชของสารละลายที่ได้
- 2) ใส่วัสดุดูดซับที่ 2 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำบาดาลจริงที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ต่างๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 3) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่สภาวะสมดุลตามเวลาที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์
- 4) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่หลงเหลืออยู่
- 5) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนชนิดวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟลูออไรด์

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
ตัวแปรต้น	- ความเข้มข้นฟลูออไรด์ - ชนิดวัสดุดูดซับ	- 2 4 6 8 10 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร - ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
ตัวแปรตาม	- ความเข้มข้นฟลูออไรด์สุดท้าย	-
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิ - ปริมาณวัสดุดูดซับ - จำนวนรอบในการปั่นกวน - เวลา	- 25 ± 2 องศาเซลเซียส - 2 กรัมต่อลิตร - 200 รอบต่อนาที - ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ

3.2.3.7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของน้ำปนเปื้อนคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเป็นวัสดุดูดซับ ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) นำสารละลาย DOC ที่มีความเข้มข้นสูง เจือจางในน้ำปราศจากไอออนจนได้ความเข้มข้น DOC เริ่มต้น 3 6 8 11 13 และ 16 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร วัดค่าพีเอชของสารละลายที่ได้
- 2) ใส่วัสดุดูดซับที่ 5 กรัมต่อลิตร ลงไปในน้ำ DOC ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 3) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่สภาวะสมดุลตามเวลาที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์
- 4) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น DOC ที่หลงเหลืออยู่

ตารางที่ 3-6 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
ตัวแปรต้น	- ความเข้มข้น DOC	- 3 6 8 11 13 และ 16 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร
ตัวแปรตาม	- ความเข้มข้น DOC สุดท้าย	-
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิ	- 25 ± 2 องศาเซลเซียส
	- ชนิดวัสดุดูดซับ	- ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
	- ปริมาณวัสดุดูดซับ	- 5 กรัมต่อลิตร
	- จำนวนรอบในการปั่นกวน	- 200 รอบต่อนาที
	- เวลา	- ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ

3.2.3.8 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ โดยใช้ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเป็นวัสดุดูดซับ ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) เตรียมน้ำบาดาลจริงซึ่งมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้น 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร วัดค่าพีเอชน้ำบาดาลจริงที่ใช้
- 2) ใส่วัสดุดูดซับที่ 2 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำตัวอย่าง
- 3) นำขวดน้ำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

- 4) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองในลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนลบด้วยเครื่อง Ion chromatography และความเข้มข้นไอออนบวกด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy
- 5) เปรียบเทียบความเข้มข้นไอออนชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

ตารางที่ 3-7 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนต่างๆ ภายหลังจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิจัย
ตัวแปรต้น	- ความเข้มข้นไอออนชนิดต่างๆ	- ความเข้มข้นไอออนชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำบาดาลจริง
ตัวแปรตาม	- ความเข้มข้นไอออนชนิดต่างๆ สูดท้าย	-
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิ - ชนิดวัสดุดูดซับ - จำนวนรอบในการปั่นกววน - เวลา	- 25±2 องศาเซลเซียส - ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด - 200 รอบต่อนาที - 6 ชั่วโมง

3.2.4 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์

ทำการศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์ โดยศึกษาทั้งกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและกระบวนการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด โดยให้น้ำตัวอย่างที่เข้าสู่ระบบคอลัมน์มีทิศทางการไหลผ่านชั้นวัสดุดูดซับจากบนลงล่าง ซึ่งใช้ Peristaltic pump ในการควบคุมอัตราการไหล

3.2.4.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์

- 1) เตรียมน้ำบาดาลจริงที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้น 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวัสดุดูดซับที่ใช้ คือ ถ่านกระดูกที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด
- 2) นำวัสดุดูดซับใส่ลงในคอลัมน์ทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จนมีความหนา 10 เซนติเมตร แล้วทำการซังน้ำหน่ววัสดุดูดซับที่ใส่ลงไป
- 3) นำน้ำตัวอย่างเข้าสู่ระบบคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตราการไหล 4.6 มิลลิตรต่อนาที

- 4) เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์ตามระยะเวลา แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่หลงเหลืออยู่ จนกระทั่งความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่วิเคราะห์ได้มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรคทลูที่กำหนดไว้ (0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเบรคทลู
- 6) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุดูดซับเป็น 12 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.2.4.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำใน

ระบบคอลัมน์

- 1) นำสารละลาย DOC ที่มีความเข้มข้นสูง เจือจางในน้ำปราศจากไอออนจนได้ความเข้มข้น DOC เริ่มต้น 7 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร โดยวัสดุดูดซับที่ใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด
- 2) นำวัสดุดูดซับใส่ลงในคอลัมน์ทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จนมีความหนา 8 เซนติเมตร แล้วทำการซังน้ำหนัวัสดุดูดซับที่ใส่ลงไป
- 3) นำน้ำตัวอย่างเข้าสู่ระบบคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตราการไหล 4.6 มิลลิตรต่อนาที
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์ตามระยะเวลา แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้น DOC ที่หลงเหลืออยู่ จนกระทั่งปริมาณค่าที่วิเคราะห์ได้มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรคทลูที่กำหนดไว้ (1.5 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร)
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเบรคทลู
- 6) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุดูดซับเป็น 10 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.2.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

ในระบบคอลัมน์

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ โดยใช้ น้ำตัวอย่างจากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 12 และ 15 เซนติเมตร สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนลบและความเข้มข้นไอออนบวกตามลำดับ ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) เลือกวัดเฉพาะความเข้มข้นไอออนที่ความเข้มข้นแตกต่างมากกว่าร้อยละ 50 จากความเข้มข้นเริ่มต้น โดยอ้างอิงจากผลการศึกษาแบบทีละเท

- 2) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองในลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนลบด้วยเครื่อง Ion chromatography และความเข้มข้นไอออนบวกด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy
- 3) เปรียบเทียบความเข้มข้นไอออนชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์

3.2.4.4 การศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์

ศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ โดยใช้ตัวอย่างจากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ที่ความยาว 12 ดังวิธีต่อไปนี้

- 1) นำน้ำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองในลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น DOC ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer
- 2) เก็บน้ำตัวอย่างที่ได้ตามระยะเวลา จนกระทั่งความเข้มข้น DOC ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง
- 3) เปรียบเทียบความเข้มข้น DOC ที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์

3.2.5 วิธีการวิเคราะห์

3.2.5.1 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์

การวิเคราะห์ความเข้มข้นฟลูออไรด์ของน้ำบาดาลจริงและน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ทั้งความเข้มข้นก่อนและหลังการทดลองจะใช้เครื่อง DR-900 Portable Colorimeter โดยเลือกใช้ Method 8029 โปรแกรมในเครื่องลำดับที่ 190 ซึ่งอุปกรณ์ใช้หลักการอ่านค่าการดูดซับแสงของตัวอย่าง และแปลงค่าการดูดซับแสงที่วัดได้เป็นค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สมการที่จัดเก็บไว้ในโปรแกรม อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่ใช้สามารถวัดความเข้มข้นฟลูออไรด์ได้สูงสุดเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์มากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงต้องเจือจางก่อนทำการตรวจวัด

3.2.5.2 การตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนลบ

การวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนลบต่างๆ (Cl^- , F^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Br^- และ PO_4^{3-}) ของน้ำบาดาลจริงทั้งความเข้มข้นก่อนและหลังการทดลองจะใช้เครื่อง Ion Chromatograph โดยวัฏภาคหนึ่งใช้คอลัมน์ TSK gel SuperC-AZ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร และขนาดอนุภาค 4 ไมโครเมตร ขณะที่วัฏภาคเคลื่อนที่ใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตกับโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 6.3 และ 1.7 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ สภาวะในการ

ทดลองใช้อัตรา 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาตรการฉีดสารตัวอย่าง 30 ไมโครลิตร ซึ่งสารละลายตัวอย่างที่ฉีดเข้าสู่เครื่อง Ion Chromatograph จะถูกนำพาให้เคลื่อนที่เข้าสู่คอลัมน์ โดยสารละลายวัฏภาคเคลื่อนที่จะพาประจุต่าง ๆ ไหลผ่านไปยังระบบกำจัดไอออนรวมกัน ทำให้เหลือเพียงไอออนของสารละลายตัวอย่างผ่านเข้าสู่ระบบวัดค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานของไอออนแต่ละชนิด โดยจะได้สมการเส้นตรง เพื่อใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของไอออนในสารละลายที่ต้องการตรวจวัด

3.2.5.3 การตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนบวก

การวิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนบวกต่างๆ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ และ K^+) ของน้ำบาดาลจริง ทั้งความเข้มข้นก่อนและหลังการทดลองจะใช้เครื่อง Atomic absorption spectroscopy รุ่น Zeenit ยี่ห้อ Analytikjena ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ด้วยการตรวจวัดการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นเฉพาะ

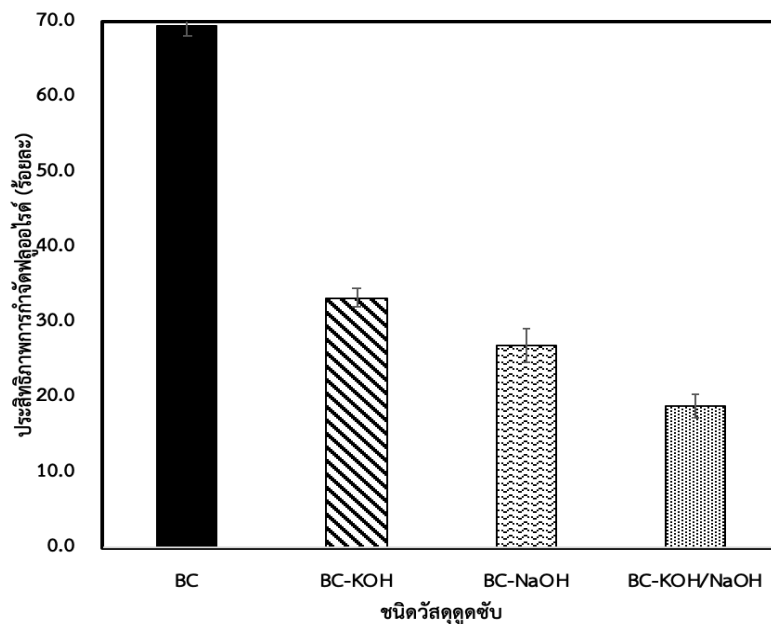
3.2.5.4 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

การวิเคราะห์ความเข้มข้น DOC ของน้ำตัวอย่างจากถ่านกระดุกทั้งความเข้มข้นก่อนและหลังการทดลองจะใช้เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม Total organic carbon (TOC) รุ่น TOC-L CPH/CPN, SSM ยี่ห้อ Shimadzu โดยใช้วิธี High Temperature Catalytic Oxidation กำหนดค่าการตรวจวัดด้วยวิธี TOC-diff ฉีดตัวอย่างครั้งละ 500 ไมโครลิตร ทำการตรวจวัดอย่างน้อย 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ

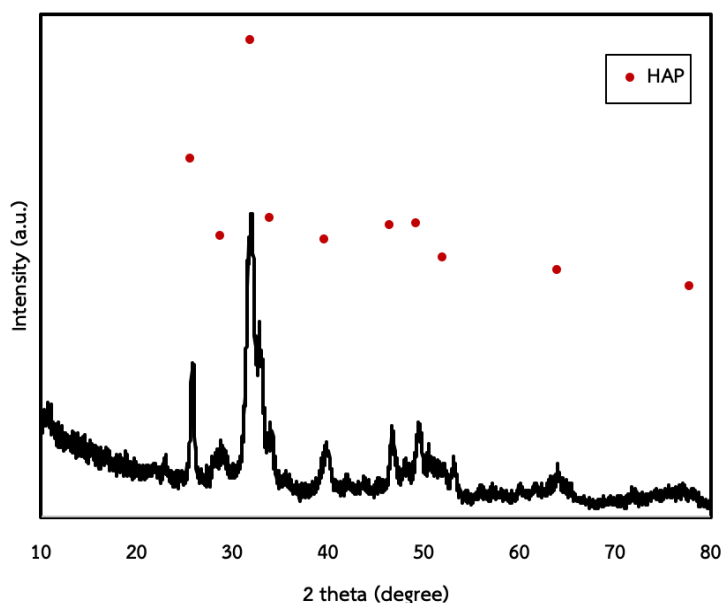
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ เพื่อหาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุด วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ ถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (BC-KOH) ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (BC-NaOH) และถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายผสมระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (BC-KOH/NaOH) ทำการทดลองแบบที่ละเท โดยนำวัสดุดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ใส่ลงในน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเท่ากับ 8.1 ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลาย จากผลการทดลองพบว่าวัสดุดูดซับ BC มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 69 รองลงมาคือวัสดุดูดซับ BC-KOH วัสดุดูดซับ BC-NaOH และวัสดุดูดซับ BC-KOH/NaOH โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์คิดเป็นร้อยละ 35.9 26.4 และ 19.4 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-1



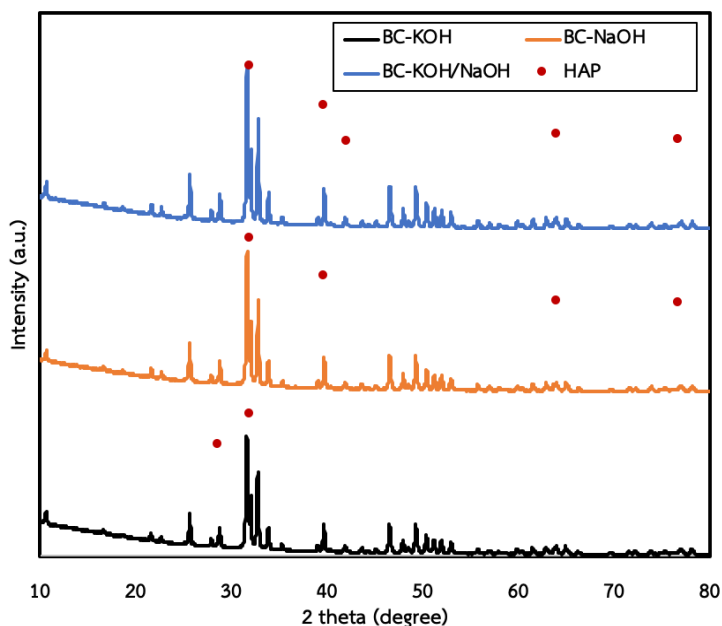
รูปที่ 4-1 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

เมื่อนำวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้น ทั้งโครงสร้างผลึก (XRD) ปริมาณธาตุ (EDX) และลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับ (SEM) เพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติมของวัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ต่ำกว่าวัสดุดูดซับธรรมชาติ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดย Cu K α radiation โดยวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนในช่วงมุม (2 theta) 10 ถึง 80 องศา พบว่ารูปแบบ XRD ของวัสดุดูดซับ BC สอดคล้องกับรูปแบบมาตรฐานของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) (ICDD, DB card number 00-001-1008) โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ปรากฏพีกที่ 25.79 28.88 31.85 33.98 39.77 46.63 49.44 52.05 63.99 และ 77.74 องศา แสดงดังรูปที่ 4-2 ซึ่งรูปแบบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Medellin-Castillo และคณะ (2014) และ Shahid, Kim และ Choi (2019) โดยรูปแบบ XRD ที่ได้ไม่พบสิ่งเจือปนที่เฉพาะเจาะจงใด ๆ ขณะที่รูปแบบ XRD ของวัสดุดูดซับ BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH พบว่ามีความสอดคล้องกับรูปแบบมาตรฐานของผลึก HAP น้อยกว่าวัสดุดูดซับ BC โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์วัสดุดูดซับ BC-KOH ปรากฏพีกที่ 28.74 และ 31.96 องศา การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุดูดซับ BC-NaOH ปรากฏพีกที่ 31.96 39.68 64.01 และ 76.81 องศา และการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุดูดซับ BC-KOH/NaOH ปรากฏพีกที่ 31.99 39.69 42.16 64.03 และ 76.85 องศา แสดงดังรูปที่ 4-3 โดยลักษณะพีกของถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีทั้ง 3 ชนิดมีความเข้มข้นของพลังงาน (intensity) ที่สูงกว่าพีกของถ่านกระดุกธรรมดา แสดงให้เห็นถึงการมีความเป็นผลึกที่มากกว่า (Laonapakul และคณะ, 2019)



รูปที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของวัสดุดูดซับ BC ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น



รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของวัสดุดูดซับ BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น

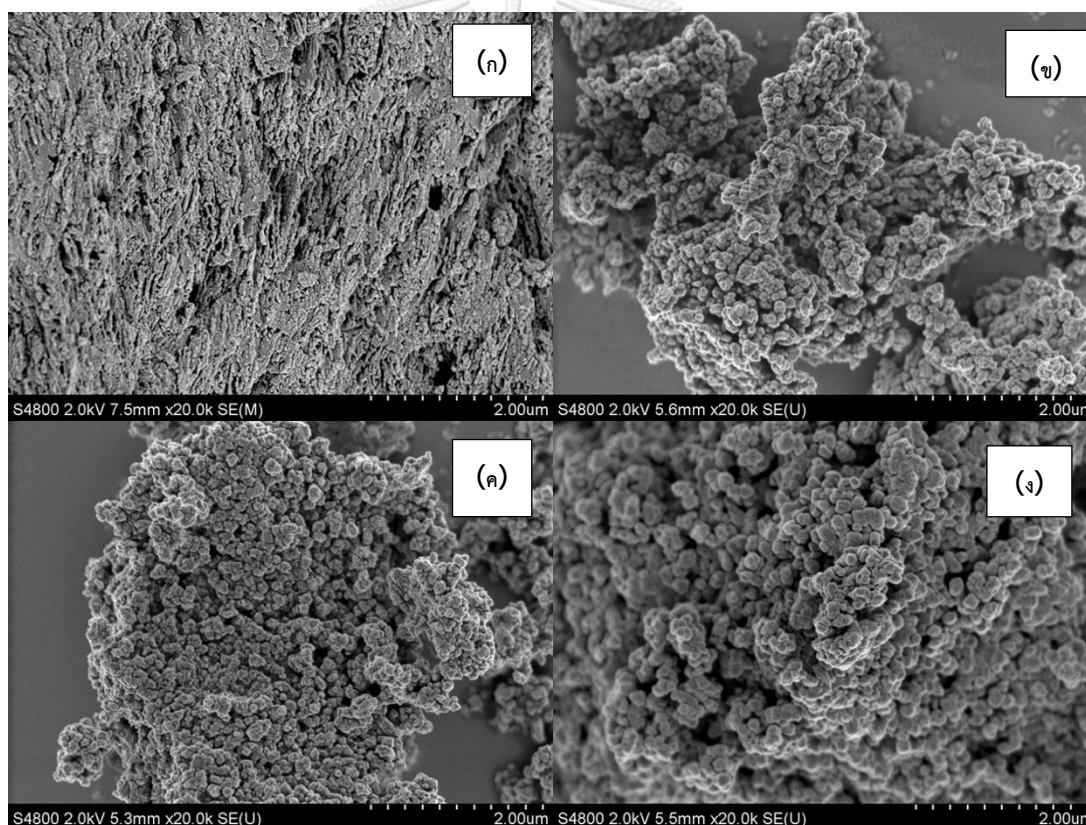
การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุบนวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด ด้วยวิธี EDX พบว่าวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณธาตุออกซิเจน ฟอสฟอรัส และแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นธาตุพื้นฐานของสาร HAP ที่อยู่ในวัสดุดูดซับ ซึ่งปริมาณแคลเซียมและฟอสฟอรัสบนวัสดุดูดซับ BC มีปริมาณมากกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ โดยปริมาณแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่มีอยู่บนวัสดุดูดซับ BC คิดเป็นร้อยละ 38.84 ± 1.43 และ 21.06 ± 0.37 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shahid และคณะ (2019) ขณะที่วัสดุดูดซับ BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH มีปริมาณแคลเซียมคิดเป็นร้อยละ 31.67 ± 2.39 33.83 ± 4.70 และ 31.04 ± 1.58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และปริมาณฟอสฟอรัสคิดเป็นร้อยละ 17.95 ± 0.66 16.97 ± 0.52 และ 16.27 ± 0.35 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4-1 ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ข้างต้น ที่แสดงให้เห็นถึงสาร HAP ที่เป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างของวัสดุดูดซับอาจลดลงหรือมีการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างเป็นสารชนิดอื่น

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบนพื้นผิววัสดุดูดซับด้วยวิธี EDX

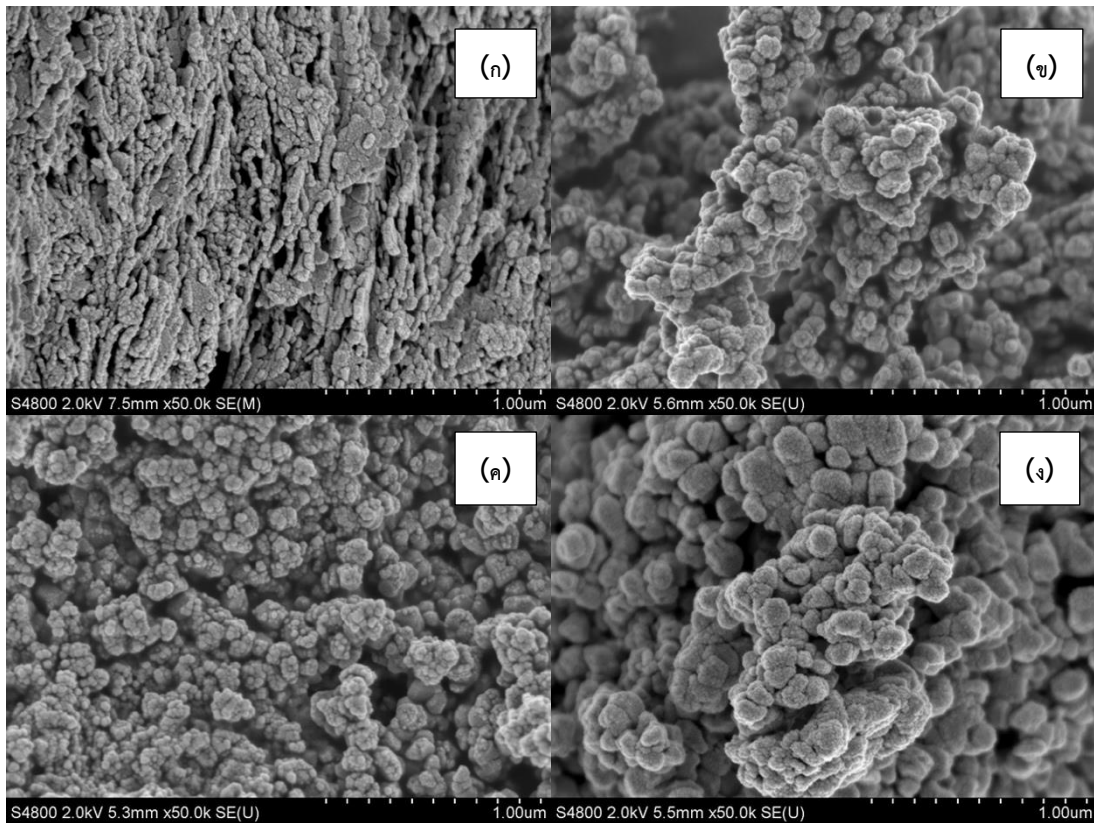
วัสดุดูดซับ	ร้อยละโดยน้ำหนัก			
	คาร์บอน	ออกซิเจน	ฟอสฟอรัส	แคลเซียม
BC	11.84 ± 5.26	31.51 ± 2.00	21.06 ± 0.37	38.48 ± 1.43
BC-KOH	8.57 ± 0.51	41.75 ± 2.75	17.95 ± 0.66	31.67 ± 2.39
BC-NaOH	9.28 ± 0.80	39.93 ± 5.97	16.97 ± 0.52	33.83 ± 4.70

วัสดุดูดซับ	ร้อยละโดยน้ำหนัก			
	คาร์บอน	ออกซิเจน	ฟอสฟอรัส	แคลเซียม
BC-NaOH/KOH	12.58 ± 3.18	40.11 ± 4.54	16.27 ± 0.35	31.04 ± 1.58

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 และ 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4-7 และ 4-8 ตามลำดับ พบว่าวัสดุดูดซับ BC ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิต ผิวขรุขระ และมีขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Rojas-Mayorga และคณะ (2013) ขณะที่วัสดุดูดซับชนิด BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH มีรูปทรงกลม ผิวขรุขระ ขนาดแตกต่างกัน และอยู่รวมกันเป็นก้อน



รูปที่ 4-4 ภาพขยายพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC (ก) BC-KOH (ข) BC-NaOH (ค) และ BC-KOH/NaOH (ง) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4-5 ภาพขยายพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC (ก) BC-KOH (ข) BC-NaOH (ค) และ BC-KOH/NaOH (ง) ที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า

จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับ BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH มีรูปแบบโครงสร้างผลึกของสาร HAP ที่ลดลง สอดคล้องกับผลปริมาณธาตุบนวัสดุดูดซับที่มีธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสลดลง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีอาจทำให้โครงสร้างของสาร HAP ในวัสดุดูดซับเปลี่ยนแปลงรูปแบบหรือมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปของงานวิจัยชิ้นนี้จึงใช้วัสดุดูดซับแบบ BC เป็นหลัก

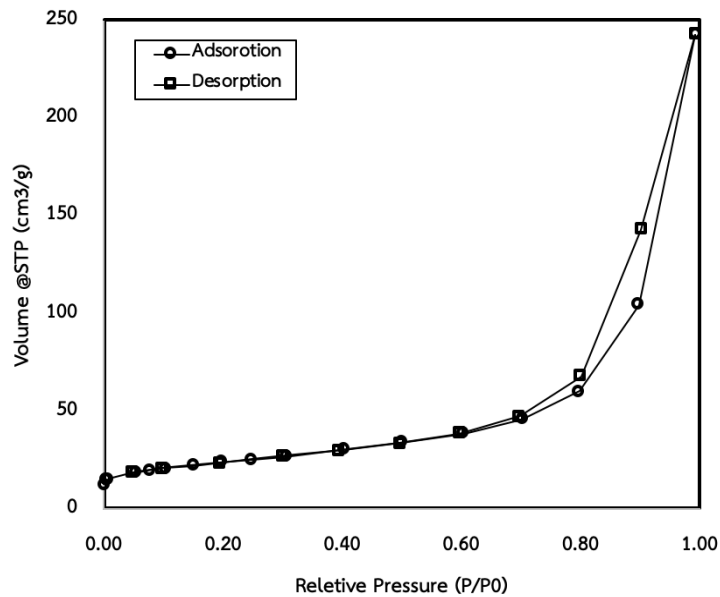
4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ BC

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับเบื้องต้นก่อนหน้านี้ ทำให้ทราบว่าวัสดุดูดซับ BC มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงที่สุด ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกวัสดุดูดซับชนิดดังกล่าวมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีเพิ่มเติม โดยทำการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจน (BET) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (FTIR) ค่าพีเอชที่ให้ค่า

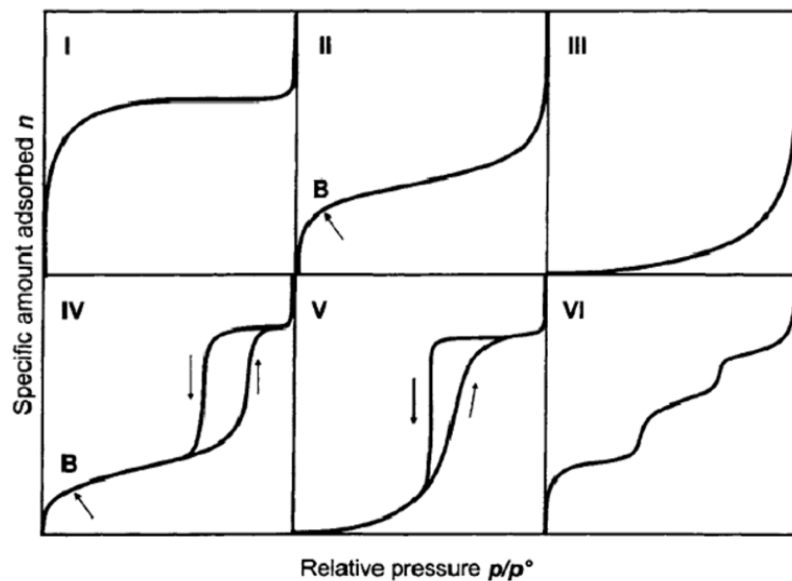
ความเป็นประจวบเป็นศูนย์ (pH_{zpc}) และการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ เพื่อให้ทราบโครงสร้างของวัสดุดูดซับ กลไกการดูดซับ และผลกระทบจากการใช้วัสดุดูดซับให้ดียิ่งขึ้น

4.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน โดยใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับไนโตรเจน ด้วยสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะคือ สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ผลการวิเคราะห์การดูดซับไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4-6 จากการคำนวณ พบว่าวัสดุดูดซับ BC มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 82.8 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย 0.376 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 18.1 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์วัสดุดูดซับ BC ในงานวิจัยของ Flores-Cano และคณะ (2016) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ ซึ่งวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์จะสูงด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะของกราฟไอโซเทอมตาม IUPAC ที่แสดงดังรูปที่ 4-7 พบว่าวัสดุดูดซับ BC เป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ 4 เป็นไอโซเทอมของการดูดซับของวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งจะแสดงถึงการดูดซับขั้นแรกอย่างสมบูรณ์ โดยเกิดฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ชนิด H3 ซึ่งเกิดจากวัสดุดูดซับมีรูปร่างเป็นแผ่นหรือเป็นมุม (slit shaped pores) มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของวัสดุดูดซับ BC

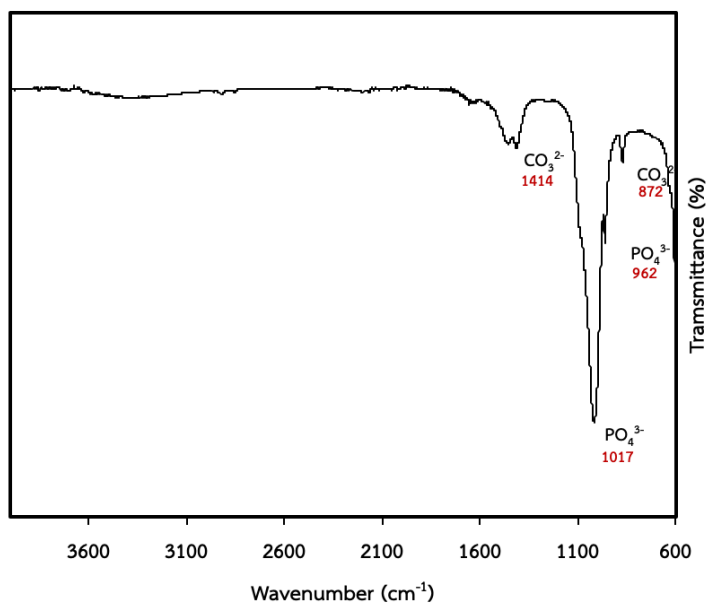


รูปที่ 4-7 กราฟไอโซเทอมตาม IUPAC

4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ทำให้หมู่ฟังก์ชันของสารแต่ละฟังก์ชันเกิดการสั่นที่มีความถี่แตกต่างกัน โดยรายงานในรูปแบบเลขคลื่น (Wave number) โดยการวัดสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่น การยืด และการงอของ

พันธะภายในโมเลกุลจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะแตกต่างกันไปตามชนิดหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4-8



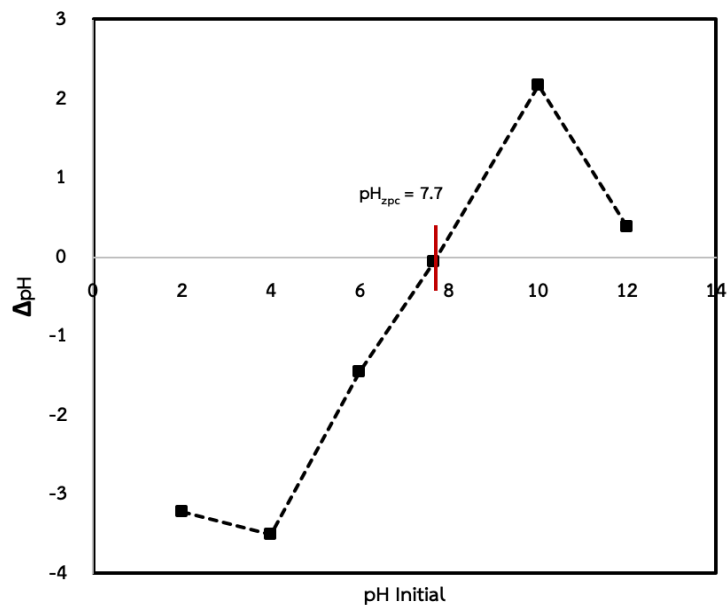
รูปที่ 4-8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม IR พบว่าวัสดุดูดซับ BC ให้ความถี่ที่ 1414 1017 962 และ 872 ต่อเซนติเมตร โดยเป็นการสั่นแบบยืดและแบบงอของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่ความถี่ 1414 และ 872 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และเป็นการสั่นแบบยืดไม่สมมาตรและสมมาตรของหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ที่ความถี่ 1017 และ 962 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นการมีอยู่ของสาร HAP และแคลเซียมฟอสเฟต โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์วัสดุดูดซับ BC ในงานวิจัยของ Nahum Andres Medellin-Castillo และคณะ (2016)

4.2.3 การวิเคราะห์ความเป็นประจุ

การวิเคราะห์ความเป็นประจุบนพื้นผิววัสดุดูดซับ โดยการไทเทรตกรด-เบสที่ค่าพีเอช 2 ถึง 12 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับค่าพีเอช พบว่าวัสดุดูดซับ BC มีค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุรวมเป็นศูนย์ (pH_{zpc}) เท่ากับ 7.7 แสดงดังรูปที่ 4-9 โดยค่าที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Mendoza-Castillo, Bonilla-Petriciolet และ Jáuregui-Rincón (2015) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายน้อยกว่าค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุรวมเป็นศูนย์ แสดงว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC มีพื้นผิวเป็นประจุบวกมากกว่า ในทางตรงกันข้าม หากค่าพีเอชของสารละลายมีค่า

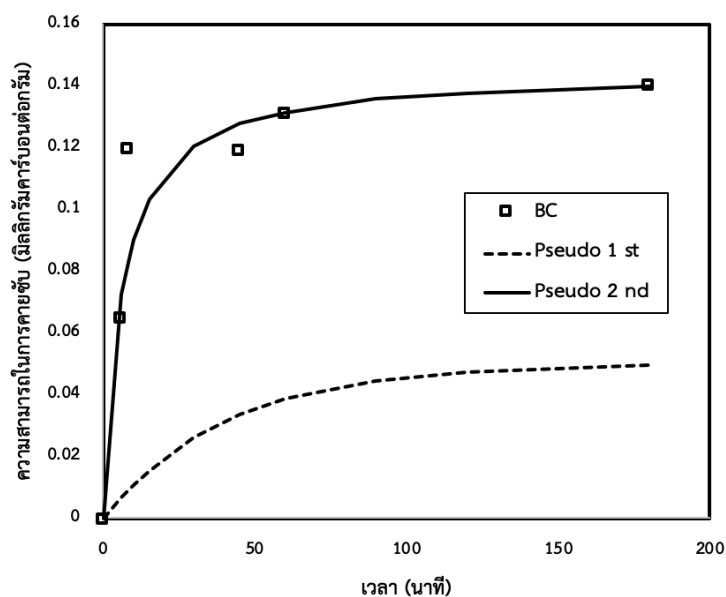
มากกว่าค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุมรวมเป็นศูนย์ พื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC มีพื้นผิวเป็นประจุลบมากกว่า



รูปที่ 4-9 ค่าพีเอชที่ให้ค่าความเป็นประจุมรวมเป็นศูนย์ (pH_{zpc}) ของวัสดุดูดซับ BC

4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) โดยการทำการทดลองแบบทีละเทในน้ำปราศจากไอออน พบว่าจลนพลศาสตร์การคายซับ DOC ของวัสดุดูดซับ BC ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงระยะเวลา 180 นาที แสดงดังรูปที่ 4-10 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับสมการคณิตศาสตร์ทั้งสมการจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งเสมือนและสมการจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสองเสมือน พบว่าวัสดุดูดซับ BC มีค่าสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสองเสมือน โดยมีค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การคายซับ DOC จากวัสดุดูดซับ BC แสดงดังตารางที่ 4-2



รูปที่ 4-10 กราฟจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากวัสดุดูดซับ BC
ตารางที่ 4-2 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากวัสดุดูดซับ BC

จลนพลศาสตร์	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ BC
Pseudo-first order	q_e (mg/g)	0.050
	k_1 (min^{-1})	0.025
	R^2	0.593
Pseudo-second order	q_e (mg/g)	0.145
	k_2 (g/mg.min)	1.148
	R^2	0.884

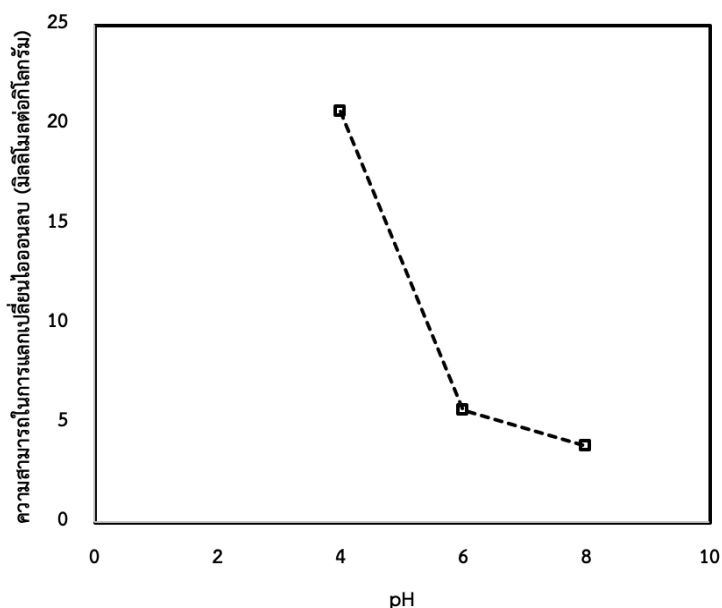
ขณะที่ความสามารถในการคายซับ DOC ของวัสดุดูดซับ BC พบว่าปริมาณ DOC แปรผันตรงกับปริมาณของวัสดุดูดซับ BC กล่าวคือ ถ้าปริมาณวัสดุดูดซับ BC ในสารละลายมีมาก ปริมาณ DOC ในสารละลายจะมีมากเช่นกัน โดยปริมาณวัสดุดูดซับ BC ที่ 20 กรัมต่อลิตร ให้การปลดปล่อย DOC ออกมาสูงสุดที่ 1.996 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ซึ่งตรงข้ามกับความสามารถในการคายซับ DOC ของวัสดุดูดซับ BC ที่แปรผกผันกับปริมาณวัสดุดูดซับ BC กล่าวคือ ถ้าปริมาณวัสดุดูดซับ BC ในสารละลายมีมาก ความสามารถในการคายซับ DOC ของวัสดุดูดซับจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากสารละลายมีความเข้มข้น DOC สูง ทำให้วัสดุดูดซับคายซับ DOC ออกมาได้ยากขึ้น โดยปริมาณวัสดุดูดซับ BC ที่ 2 กรัมต่อลิตร ให้ความสามารถในการคายซับ DOC ออกมาสูงสุดที่ 0.553 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อกรัม แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและความสามารถในการคายซับของวัสดุดูดซับ BC

ปริมาณ BC (g/l)	ปริมาณ DOC (mg _{Carbon} /l)	ความสามารถในการคายซับ (mg _{Carbon} /g)
2	1.105	0.553
6	1.094	0.547
8	1.277	0.319
10	1.257	0.126
15	1.494	0.100
20	1.996	0.100

4.2.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Capacity, AEC) ของวัสดุดูดซับ BC ทำการทดลองแบบทีละเทในสารละลายที่มีค่าพีเอช 4 6 และ 8 โดยใช้ปริมาณโบรไมด์ (Br⁻) ที่คงเหลือในสารละลายเป็นตัวชี้วัด จากการทดลอง พบว่าค่า AEC มีค่าลดลงเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4-11 โดยสามารถอธิบายได้ว่าวัสดุดูดซับ BC มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดีที่ค่าพีเอชของสารละลายต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเป็นประจุมเป็นศูนย์ของวัสดุดูดซับ BC ที่แสดงประจุมวก ขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายสูงอาจมีการแข่งขันในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ส่งผลให้ค่า AEC ของวัสดุดูดซับลดลง (Lawrinenko และ Laird, 2015)



รูปที่ 4-11 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของวัสดุดูดซับ BC

4.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบทีละเท

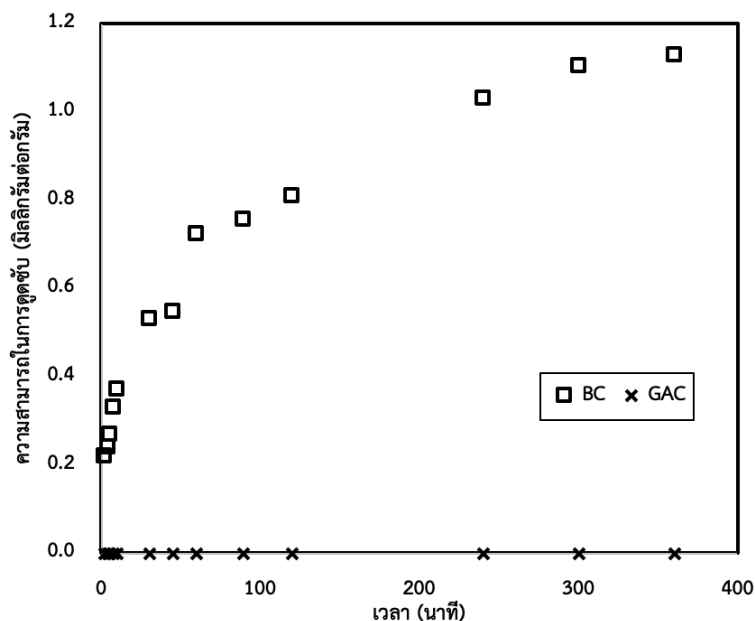
การศึกษากระบวนการดูดซับแบบทีละเทจะทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ กลไกการแพร่ภายในอนุภาค และไอโซเทอมการดูดซับทั้งการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) และการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) โดยขนาดของวัสดุดูดซับ BC และ GAC ที่ใช้คือ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร (ขนาด 18 ถึง 10 Mesh) และ 1.68 ถึง 4.76 มิลลิเมตร (ขนาด 12 ถึง 4 Mesh) ตามลำดับ รวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนในน้ำก่อนและหลังกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC

4.3.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.3.1.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์

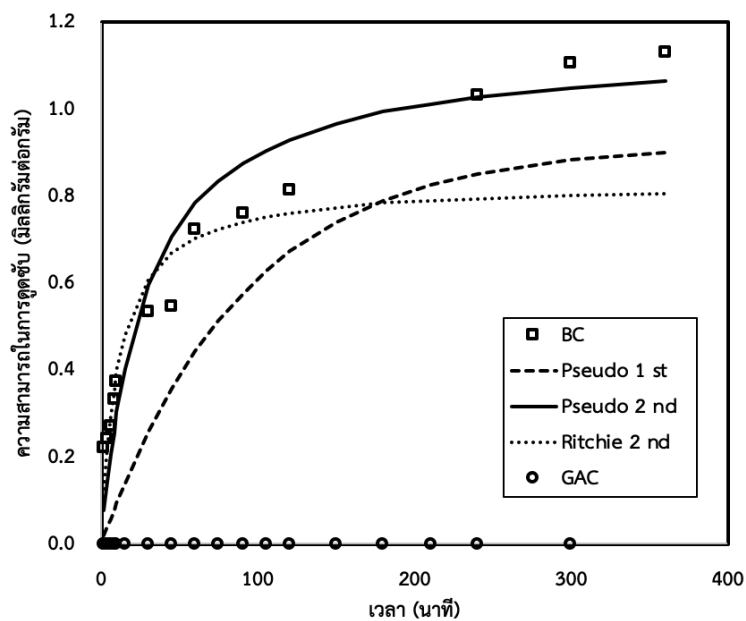
การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ ถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) และ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) โดยนำวัสดุดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ใส่ลงในน้ำบาดาลจริงที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 3.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายตามระยะเวลาจนกระทั่งความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำไปคำนวณความสามารถในการ

ดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC และ GAC (น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่ามีเพียงวัสดุดูดซับ BC เท่านั้นที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ โดยการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ BC เข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที และเมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับสมการคณิตศาสตร์ทั้งสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนและอันดับสองเสมือน พบว่าวัสดุดูดซับ BC มีค่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน โดยพิจารณาจากค่า R^2 และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) และค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่หนึ่งเสมือน (k_1) ดังตารางที่ 4-4 โดยรูปที่ 4-13 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งสามสมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ทั้งนี้การดูดซับฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากกลไกแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวของวัสดุดูดซับ BC กับฟลูออไรด์ไอออนในน้ำบาดาล อย่างไรก็ตามกลไกดังกล่าวอาจไม่ใช่กลไกหลักในการดูดซับฟลูออไรด์ เนื่องจากค่าความเป็นประจุรวมเป็นศูนย์ของวัสดุดูดซับ BC อยู่ที่ 7.7 ซึ่งน้อยกว่าค่าพีเอชของสารละลาย ทำให้พื้นผิวของวัสดุดูดซับ BC แสดงพื้นผิวเป็นประจุลบ ซึ่งอาจส่งผลต่อแรงดึงดูดทางไฟฟ้าได้



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ

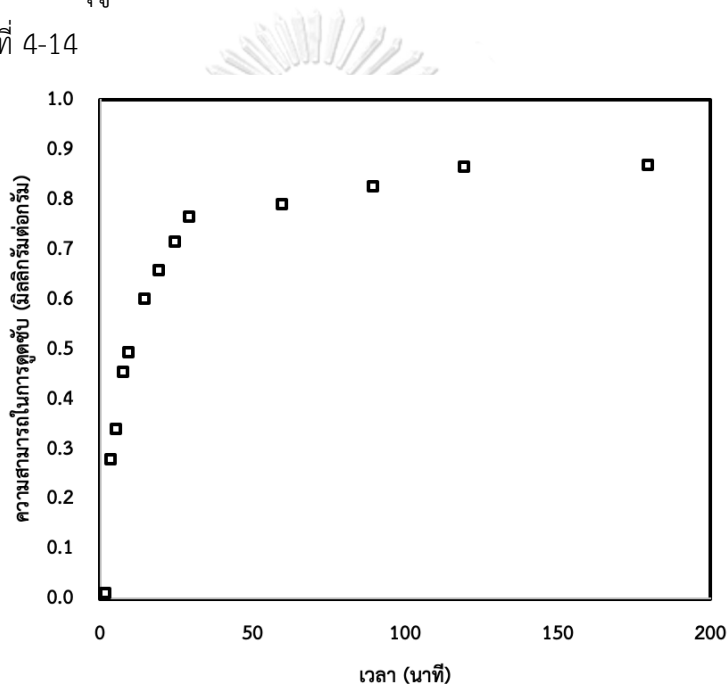
BC

ตารางที่ 4-4 ค่าตัวแปรสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC

จลนพลศาสตร์	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ BC
Pseudo-first order	q_e (mg/g)	0.847
	k_1 (min^{-1})	0.010
	R^2	0.984
Pseudo-second order	q_e (mg/g)	1.146
	k_2 (g/mg.min)	0.031
	h	0.041
	$t^{1/2}$ (min)	36.53
	R^2	0.940
Ritchie-second order	q_e (mg/g)	0.831
	k_r (L/min)	0.091
	R^2	0.858

4.3.1.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

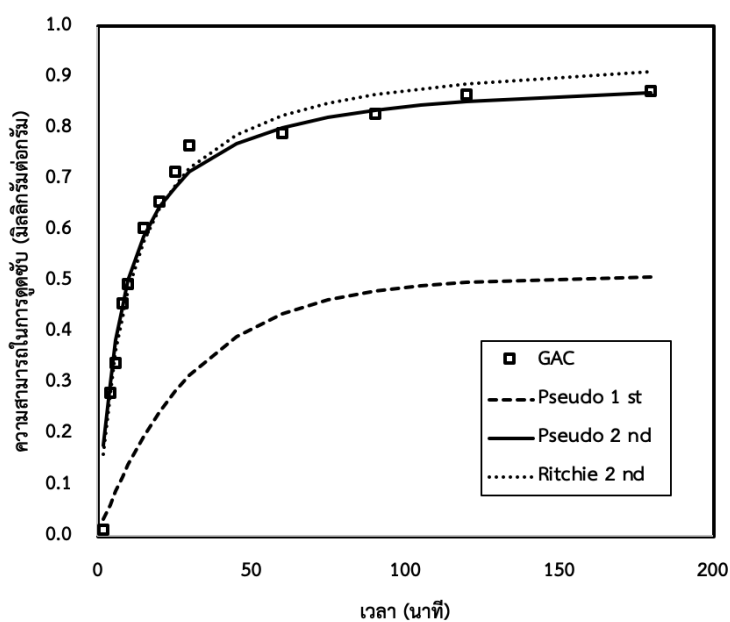
การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) โดยนำวัสดุดูดซับปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ใส่ลงในน้ำ DOC ที่สังเคราะห์ขึ้นจากถ่านกระดูกที่ความเข้มข้น DOC เริ่มต้น 5.743 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ DOC ที่เหลืออยู่ในสารละลายตามระยะเวลาจนกระทั่งความเข้มข้น DOC ที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และนำไปคำนวณความสามารถในการดูดซับ DOC ของวัสดุดูดซับ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ DOC กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC (น้ำสังเคราะห์ DOC จากถ่านกระดูก ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่าการดูดซับ DOC ของวัสดุดูดซับ GAC เข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที และเมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ DOC ที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับสมการคณิตศาสตร์ทั้งสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนและอันดับสองเสมือน พบว่าวัสดุดูดซับ GAC มีค่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน โดยพิจารณาจากค่า R^2 และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) และค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเสมือน (k_2) ดังตารางที่ 4-5 โดยรูปที่ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งสาม

สมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ทั้งนี้การดูดซับ DOC ที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากวัสดุดูดซับ GAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงและหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย ซึ่งอาจเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างผิวของวัสดุดูดซับ GAC กับ DOC ในสารละลาย และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) ประกอบกับ DOC ในสารละลายอาจมีโมเลกุลขนาดเล็กถึงปานกลาง ทำให้สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนด้านในของวัสดุดูดซับ GAC ได้ (Gibert และคณะ, 2013)



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC

ตารางที่ 4-5 ค่าตัวแปรสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC

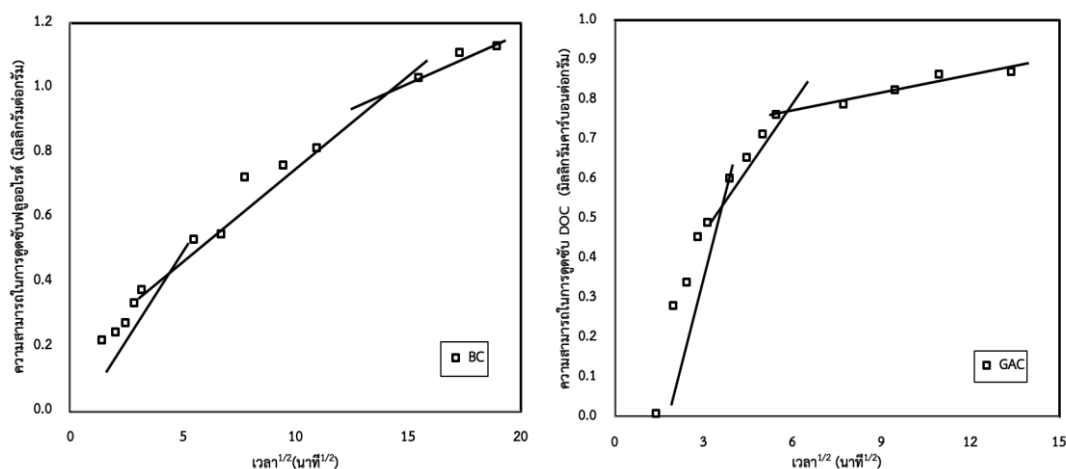
จลนพลศาสตร์	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ GAC
Pseudo-first order	q_e (mg/g)	0.509
	k_1 (min^{-1})	0.035
	R^2	0.854
Pseudo-second order	q_e (mg/g)	0.911
	k_2 (g/mg.min)	0.133
	h	0.112

จลนพลศาสตร์	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ GAC
	$t^{1/2}$ (min)	8.225
	R^2	0.977
Ritchie-second order	q_e (mg/g)	0.961
	k_r (L/min)	0.101
	R^2	0.966

4.3.2 กลไกการแพร่ภายในอนุภาค

กลไกการดูดซับระหว่างของเหลวและของแข็งมีสามขั้นตอน ค่า k_1 แรกเป็นการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังบริเวณผิวภายนอกวัสดุดูดซับ (Film diffusion) ค่า k_2 ที่สองเป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับ (Pore diffusion) ทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุน โดยทั้งสองขั้นตอนแรกอาจเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ (Rate limiting step) และค่า k_3 ที่สามเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับผ่านปฏิสัมพันธ์ของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและโครงสร้างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดรวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละลายได้

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับก่อนหน้ามาสร้างกราฟตามสมการการแพร่ภายในวัสดุดูดซับ สามารถแบ่งลำดับการดูดซับออกเป็นสามขั้นตอนดังรูปที่ 4-16 สำหรับการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC พบกลไกการดูดซับเกิดขึ้นทั้งสามขั้นตอน โดยอัตราการดูดซับขั้นตอนที่สองที่แสดงโดยค่าคงที่อัตราการแพร่กระจายภายในรูพรุน (k_{i2}) เป็นบทบาทสำคัญในขั้นตอนนี้ เนื่องจากค่าคงที่อัตราการแพร่กระจายภายในรูพรุน (k_{i2}) มีค่าน้อยกว่าค่าอัตราเร็วการแพร่ภายนอก (k_{e1}) แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วอัตราดูดซับ โดยค่าคงที่อัตราการแพร่ แสดงดังตารางที่ 4-6



รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์และคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำกับเวลาโดยวัสดุดูดซับ BC และ GAC

ตารางที่ 4-6 ค่าคงที่อัตราการแพร่

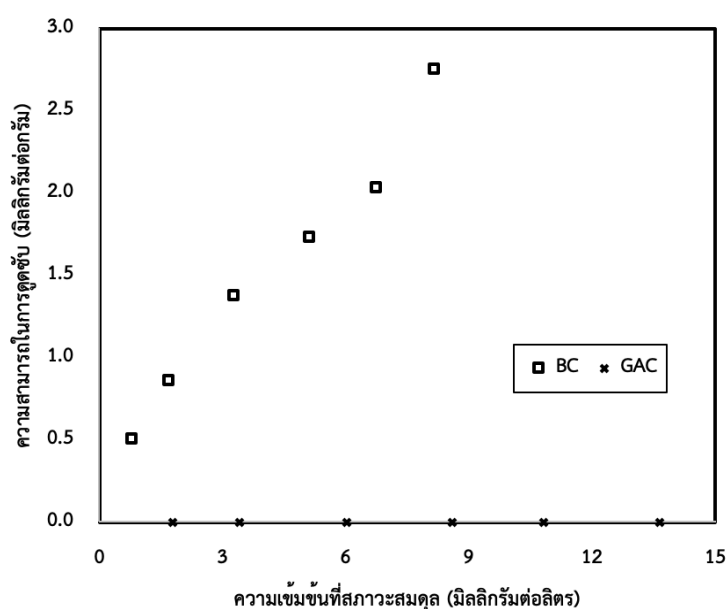
กลไกการดูดซับ	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ BC	วัสดุดูดซับ GAC
External diffusion step	k_{i1} (mg/g.min ^{1/2})	0.089	0.295
	C	0.077	-0.325
	R ²	0.920	0.945
Internal diffusion step	k_{i2} (mg/g.min ^{1/2})	0.055	0.102
	C	0.233	0.204
	R ²	0.880	0.998

4.3.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลการดูดซับโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้คือ ไอโซเทอมแบบเส้นตรง ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิช ไอโซเทอมแบบชิปส์ และไอโซเทอมแบบเรดลิชและปีเตอร์สัน

4.3.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์บนวัสดุดูดซับ BC และ GAC โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยใช้ น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 ภายใต้ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ ความเร็ว 200 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับและทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล แสดงดังรูปที่ 4-17

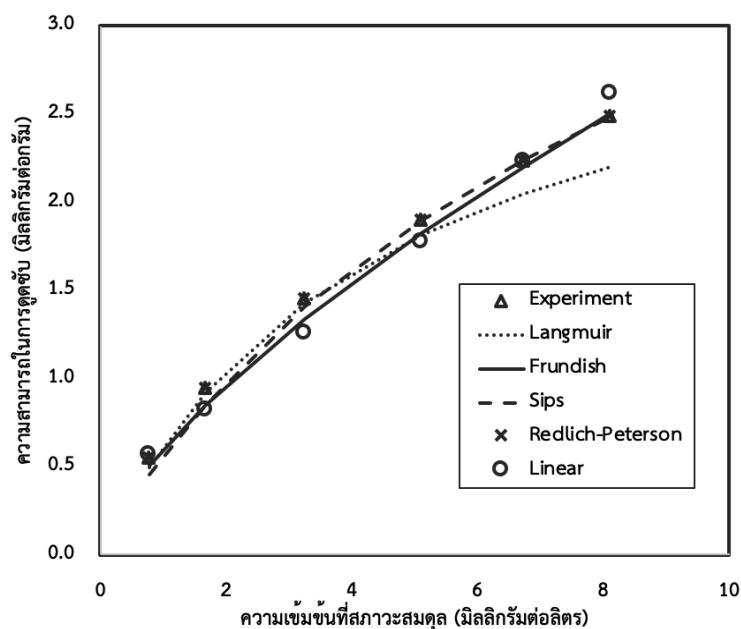


รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC และ GAC

(น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่ามีเพียงวัสดุดูดซับ BC เท่านั้นที่เกิดการดูดซับขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยวัสดุดูดซับ BC มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดเท่ากับ 2.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 8.12 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 6 สมการ พบว่าวัสดุดูดซับ BC มีค่าไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่แสดงดังตารางที่ 4-7 โดยรูปที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณ

จากไอโซเทอมทั้งหกสมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ทั้งนี้การดูดซับฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นบนวัสดุดูดซับ BC อาจเป็นปรากฏการณ์ดูดซับที่ไม่รุนแรง มีสัดส่วนการปกคลุมพื้นที่ผิววัสดุดูดซับน้อย



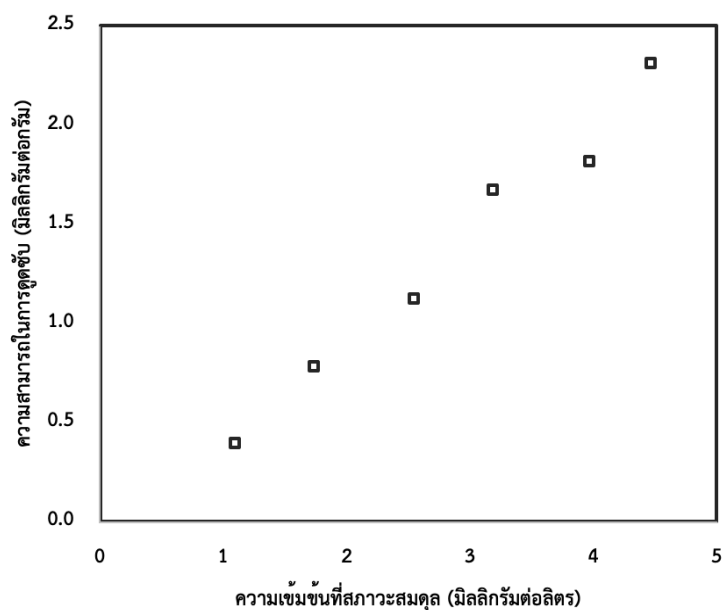
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC ตารางที่ 4-7 ค่าตัวแปรไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์โดยวัสดุดูดซับ BC

ไอโซเทอม	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ BC
เส้นตรง	K_p (L/mg)	0.279
	C	0.347
	R^2	0.976
แลงเมียร์	q_m (mg/g)	3.460
	b (L/mg)	0.215
	R^2	0.930
ฟรอนด์ลิช	K_F (mg/L)(L/mg) $^{1/n}$	0.598
	1/n	0.683
	R^2	0.970

ไอโซเทอม	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ BC
ซีปส์	q_m (mg/g)	5.817
	K_S (L/mg) ^{1/n}	0.107
	1/n	0.927
	R^2	0.955
เรดลิกซ์และปีเตอร์สัน	K_{RP} (L/g)	1.382
	b_j (L/mg) ^{1/β}	1.085
	$β$	0.563
	R^2	0.960

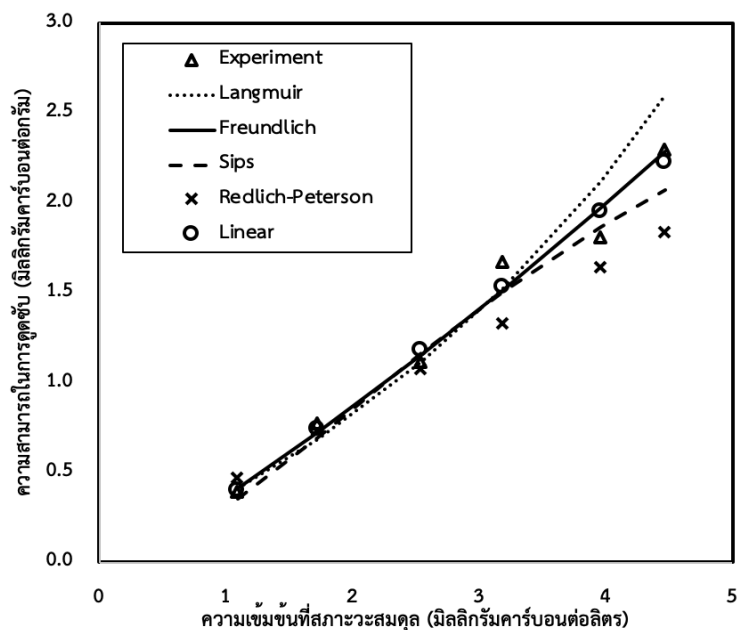
4.3.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) บนวัสดุดูดซับ GAC โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยใช้ น้ำ DOC ที่สังเคราะห์ขึ้นจากถ่านกระดูก ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับและทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ DOC ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล แสดงดังรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC (น้ำสังเคราะห์ DOC จากถ่านกระดุก ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่าวัสดุดูดซับ GAC มีความสามารถในการดูดซับ DOC สูงสุดเท่ากับ 2.30 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 4.48 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ DOC ที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับกับสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งหกสมการ พบว่าวัสดุดูดซับ GAC มีค่าไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับทั้งแบบเส้นตรงและแบบเรดลิสและปีเตอร์สัน โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่แสดงดังตารางที่ 4-8 โดยรูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากไอโซเทอมทั้งหกสมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ทั้งนี้การดูดซับ DOC ที่เกิดขึ้นบนวัสดุดูดซับ GAC อาจเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นในช่วงแรกเท่านั้น หรืออาจเป็นปรากฏการณ์ดูดซับที่ไม่รุนแรง มีสัดส่วนการปกคลุมพื้นที่ผิววัสดุดูดซับน้อย



รูปที่ 4-20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ
โดยวัสดุดูดซับ GAC

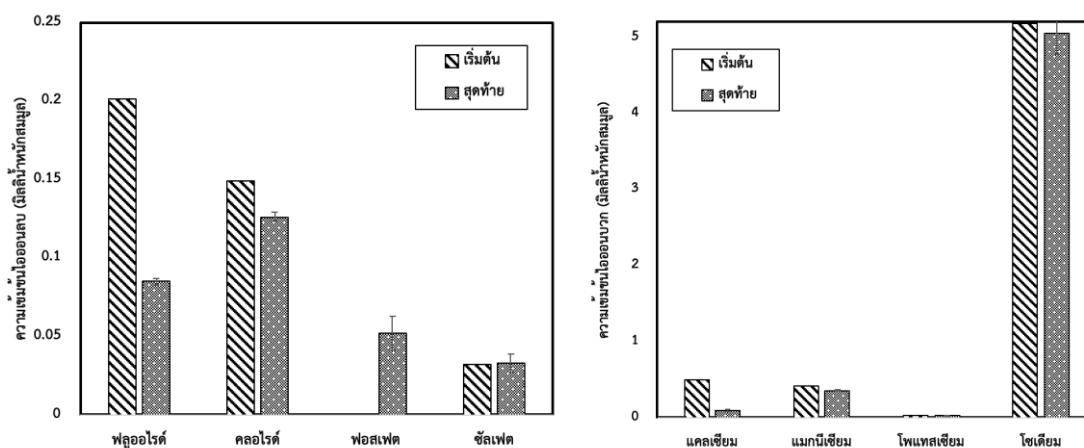
ตารางที่ 4-8 ค่าตัวแปรไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำโดยวัสดุดูดซับ GAC

ไอโซเทอม	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ GAC
เส้นตรง	K_p (L/mg)	0.541
	C	-0.192
	R^2	0.980
แลงเมียร์	q_m (mg/g)	-3.432
	b (L/mg)	-0.096
	R^2	0.966
ฟรุนด์ลิช	K_F (mg/L)(L/mg) $^{1/n}$	0.368
	1/n	1.219
	R^2	0.978
ชิปส์	q_m (mg/g)	3.934

ไอโซเทอม	พารามิเตอร์	วัสดุดูดซับ GAC
	$K_S (L/mg)^{1/n}$	0.084
	$1/n$	1.725
	R^2	0.976
เรดลิกซ์และปีเตอร์สัน	$K_{RP} (L/g)$	0.433
	$b_j (L/mg)^{1/\beta}$	0.012
	β	0.995
	R^2	0.980

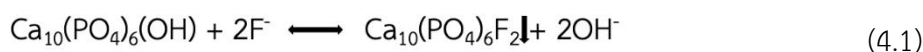
4.3.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ ถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) โดยนำวัสดุดูดซับปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ใส่ลงในน้ำบาดาลจริงที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ คลอไรด์ ฟอสเฟต และซัลเฟต เท่ากับ 3.82 5.30 0.00 และ 1.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม เท่ากับ 10.10 5.02 1.11 และ 119.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.3 ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเขย่าด้วยด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งไอออนบวกและลบที่เหลืออยู่ในสารละลาย และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนบวกและลบภายหลังกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นทั้งไอออนบวกและลบ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของไอออนที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าร้อยละ 50 ได้แก่ ความเข้มข้นฟลูออไรด์ ฟอสเฟต และแคลเซียม โดยความเข้มข้นฟลูออไรด์ลดลงเหลือ 1.61 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 57.7 ความเข้มข้นฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 1.65 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 100 และความเข้มข้นแคลเซียมลดลงเหลือ 1.76 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 82.6 นอกจากนี้ค่าพีเอชของสารละลายยังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 8.72 โดยกราฟความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของไอออนบวกและลบจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC แสดงดังรูปที่ 4-21



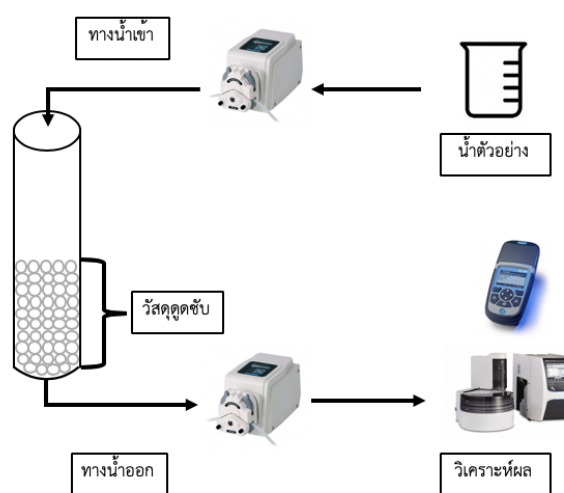
รูปที่ 4-21 กราฟความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของไอออนบวกและลบจากกระบวนการดูดซับ ฟลูออไรต์ด้วยวัสดุดูดซับ BC

ทั้งนี้ความเข้มข้นของฟลูออไรต์ที่ลดลงอาจเกิดจาก 2 กลไกหลักคือ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการตกตะกอน (Precipitation) เนื่องจากฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายสามารถแลกเปลี่ยนกับกลุ่มของไฮดรอกไซด์ไอออนที่อยู่ในโครงสร้างของสาร HAP ภายในวัสดุดูดซับ กลายเป็นสารฟลูออราพาไทต์ (FAP) ในรูปไม่ละลายน้ำ โดยการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของค่าพีเอชของสารละลายเป็นผลมาจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงรูปแบบของสาร FAP และกระบวนการตกตะกอนที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการที่ 4.1 ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากรูปแบบของแคลเซียมฟอสเฟตที่อยู่ในวัสดุดูดซับมีหลายรูปแบบทั้งใดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮเดรต (Ca_2HPO_4) ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{Ca}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และเตตระแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ทำให้ฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมที่อยู่ภายในวัสดุดูดซับกลายเป็นแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ในรูปไม่ละลายน้ำ และปลดปล่อยฟอสเฟตไอออนที่อยู่ภายในวัสดุดูดซับออกมาสู่สารละลาย แสดงดังสมการที่ 4.2 (Ismail และ AbdelKareem, 2015) สำหรับความเข้มข้นของแคลเซียมที่ลดลงอาจเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมไอออนเดิมที่มีอยู่ในสารละลายกับฟอสเฟตไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมากลายเป็นแคลเซียมฟอสเฟตในรูปไม่ละลายน้ำและไม่เสถียร (Greenwood, Rainey และ Doherty, 2007) ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายลดลง แสดงดังสมการที่ 4.3



4.4 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์

การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์จะทำการศึกษากาแฟเบรคทรูและการออกแบบระบบคอลัมน์ทั้งการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) และการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) โดยขนาดของวัสดุดูดซับ BC และ GAC ที่ใช้คือ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร (ขนาด 18 ถึง 10 Mesh) และ 1.68 ถึง 4.76 มิลลิเมตร (ขนาด 12 ถึง 4 Mesh) ตามลำดับ รวมถึงการศึกษาเปลี่ยนแปลงไอออนและการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC ทั้งนี้รูปแบบการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-22

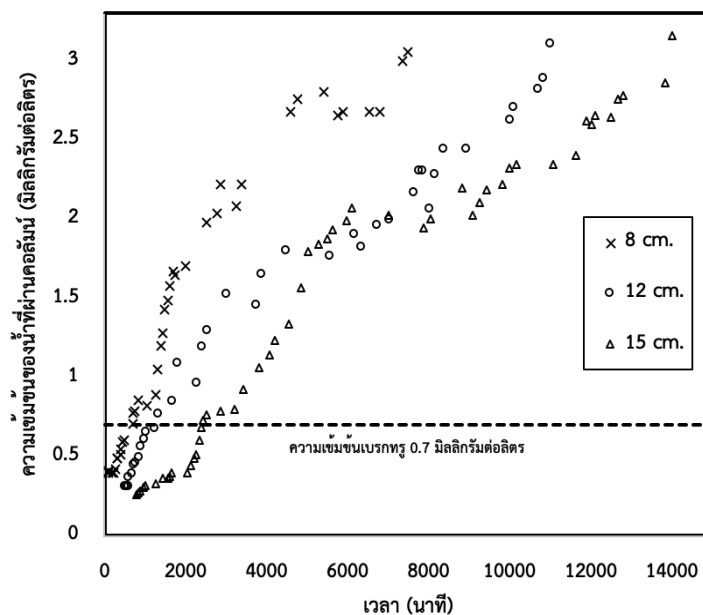


รูปที่ 4-22 รูปแบบการทดลองกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์

4.4.1 การศึกษากาแฟเบรคทรูของชั้นวัสดุดูดซับที่มีความยาวต่างๆ

4.4.1.1 การศึกษาเบรคทรูการดูดซับฟลูออไรด์

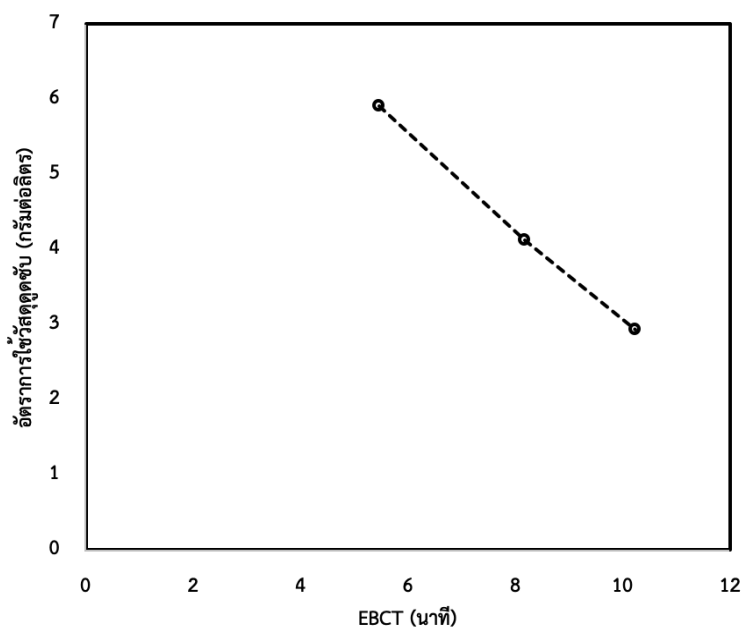
การศึกษาเบรคทรูการดูดซับฟลูออไรด์ วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ ถ่านกระดูกธรรมชาติ (BC) โดยนำวัสดุดูดซับ BC ใส่ลงในระบบคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และความยาว 8 12 และ 15 เซนติเมตร จากนั้นนำน้ำบาดาลจริงเข้าสู่ระบบคอลัมน์ในทิศทางการไหลจากบนลงล่างที่อัตราการไหลที่ 4.6 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายตามระยะเวลาจนกระทั่งความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ได้เข้าสู่ความเข้มข้นเบรคทรู (0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์ที่มีความยาวคอลัมน์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-23



รูปที่ 4-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ผ่านระบบคอลัมน์ BC ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆกับเวลา

(น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 8 12 และ 15 เซนติเมตร เข้าสู่ความเข้มข้นเบรกทรูหลังเดินระบบที่เวลา 660 1,260 และ 2,360 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับที่มีความยาวคอลัมน์ต่างๆ พบว่าค่า EBCT และปริมาณของสารละลายที่ผ่านคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดเบรกทรู (V_b) มีค่ามากขึ้น ขณะที่อัตราการใช้วัสดุดูดซับมีค่าน้อยลงเมื่อความสูงของชั้นวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการใช้วัสดุดูดซับที่มีค่าน้อยแสดงถึงการใช้วัสดุดูดซับได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด โดยแสดงค่าดังกล่าวตามตารางที่ 4-9 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับ BC แสดงดังรูปที่ 4-24



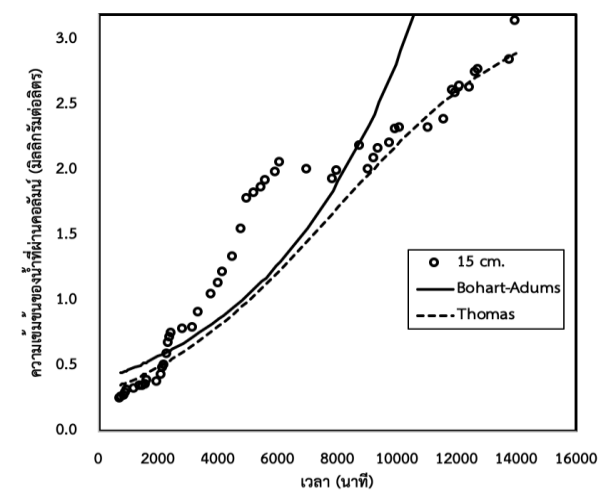
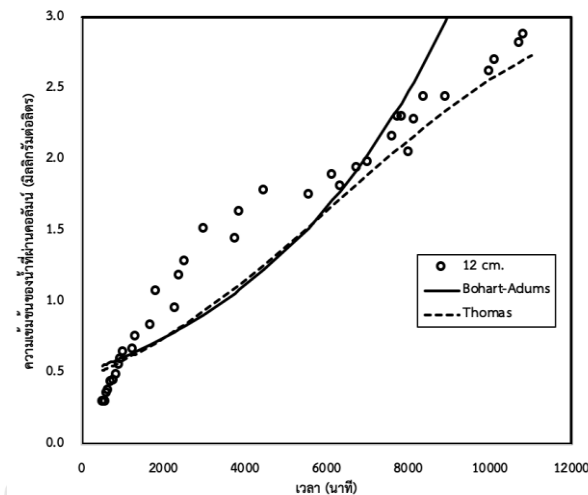
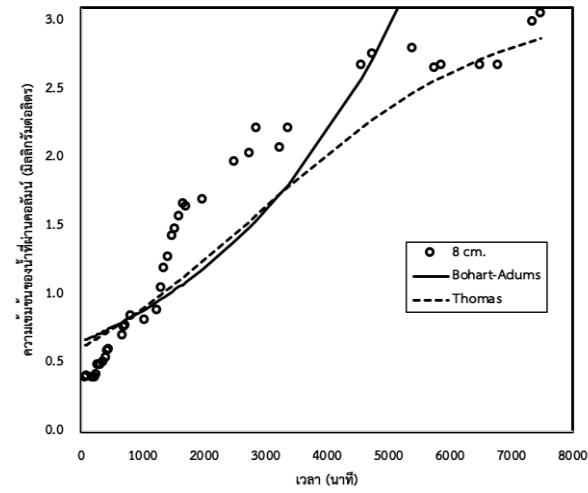
รูปที่ 4-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับ BC (น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4-9 ค่า EBCT และ อัตราการใช้วัสดุดูดซับ BC

พารามิเตอร์	ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ (เซนติเมตร)		
	8	12	15
น้ำหนักวัสดุดูดซับ (g)	17.97	23.92	31.79
ปริมาตรของชั้นวัสดุดูดซับ (cm ³)	25.12	37.68	47.10
เวลาที่จุดเบรคทुरु (min)	660	1260	2360
ปริมาตรของสารละลายที่ผ่านคอลัมน์	3.04	5.80	10.86
จนกระทั่งถึงจุดเบรคทुरु (L)			
EBCT (min)	5.46	8.19	10.24
อัตราการใช้วัสดุดูดซับ (g/l)	5.92	4.13	2.93

นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลกราฟเบรคทुरुที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับแบบจำลองทั้งแบบจำลองของโบฮาร์ทและอดัม และแบบจำลองของโทมัส พบว่าวัสดุดูดซับ BC มีการดูดซับแบบคอลัมน์สอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส โดยพิจารณาจากค่า R^2 และเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ในแบบจำลองของโทมัสที่มีค่า R^2 มากกว่า 0.91 พบว่าเมื่อความสูงของชั้นวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราเร็วของโทมัส (k_{TH}) มีแนวโน้มลดลง โดยกราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับใน

ระบบคอลัมน์ และค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของระบบคอลัมน์ที่ความสูงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-25 และตารางที่ 4-10 ตามลำดับ

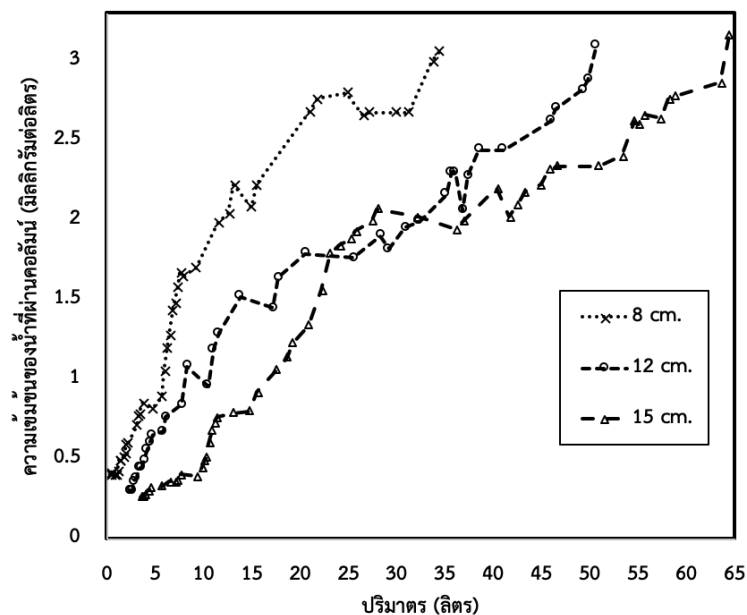


รูปที่ 4-25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ที่มีความสูงของวัสดุดูดซับ BC 8 10 และ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-10 ค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของระบบคอลัมน์ที่มีความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ BC ต่างๆ

แบบจำลอง	ค่าคงที่	ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ (เซนติเมตร)		
		8	12	15
โบฮาร์ทและอดัม	k_{AB} (L/mg.min)	9.49×10^{-5}	5.92×10^{-5}	5.93×10^{-5}
	N_0 (mg/l)	3093	3939	3569
	R^2	0.706	0.861	0.764
โทมัส	k_{Th} (L/mg.min)	1.58×10^{-4}	8.88×10^{-5}	8.90×10^{-5}
	q_0 (mg/l)	2.29	4.03	3.84
	R^2	0.914	0.946	0.903

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์และปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์ แสดงดังรูปที่ 4-26 ซึ่งสามารถหาความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ BC ในระบบคอลัมน์ได้ โดยนำความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับ (พื้นที่เหนือเส้นกราฟ) หารด้วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับในแต่ละระดับชั้นความลึก ทั้งนี้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับของระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 8 12 และ 15 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 32.22 61.74 และ 82.26 มิลลิกรัม ตามลำดับ และน้ำหนักวัสดุดูดซับของระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 8 12 และ 15 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 17.97 23.92 และ 31.79 กรัม ตามลำดับ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ BC ในระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 8 12 และ 15 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1.793 2.582 และ 2.588 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้กับความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ BC ในระบบแบบที่ละเท พบว่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์มีค่ามากกว่าระบบแบบที่ละเท ซึ่งอาจเกิดจากระยะเวลาสมดุลที่ได้จากการทดลองแบบที่ละเทอาจน้อยกว่าระยะเวลาสมดุลที่แท้จริง ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่ระยะเวลาดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

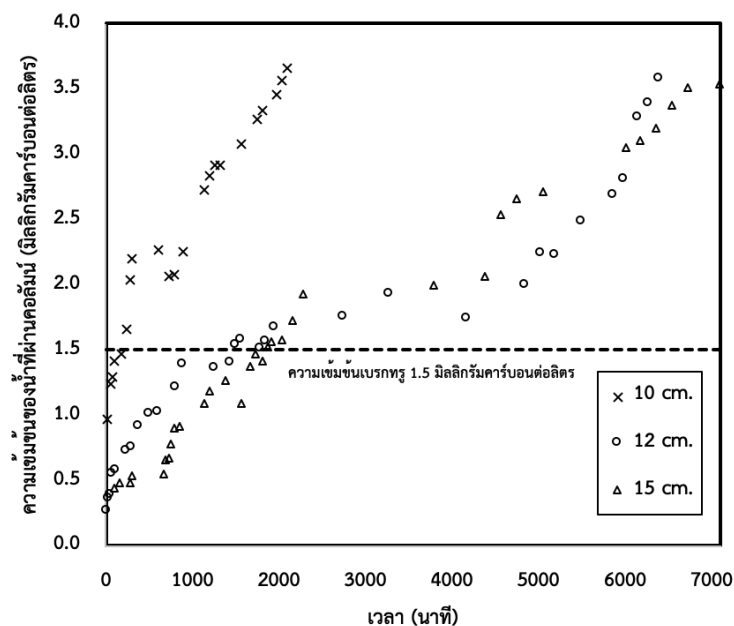


รูปที่ 4-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์และปริมาตรน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์ BC ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆ

(น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.4.1.3 การศึกษาเบรทการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

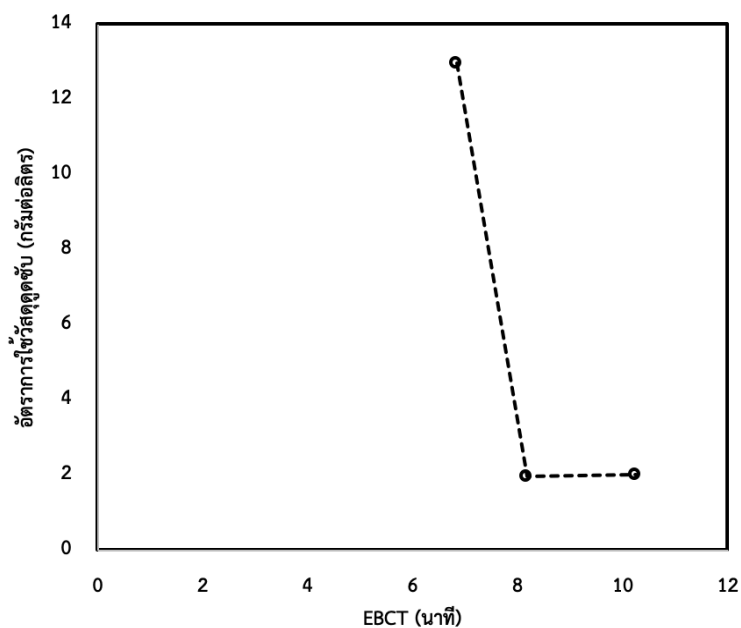
การศึกษาเบรทการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด โดยใส่วัสดุดูดซับในระบบคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 12 และ 15 เซนติเมตร จากนั้นนำน้ำ DOC ที่สังเคราะห์ขึ้นจากถ่านกระดูกเข้าสู่ระบบคอลัมน์ในทิศทางกรไหลจากบนลงล่างที่อัตราการไหลที่ 4.6 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ DOC ที่เหลืออยู่ในสารละลายตามระยะเวลาจนกระทั่งความเข้มข้น DOC ที่ได้เข้าสู่ความเข้มข้นเบรทการ (1.5 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร) ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-27



รูปที่ 4-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ DOC ที่ผ่านระบบคอลัมน์ GAC ที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆกับเวลา

(น้ำสังเคราะห์ DOC จากถ่านกระดูก ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 10 12 และ 15 เซนติเมตร เข้าสู่ความเข้มข้นเบรกทรูหลังเดินระบบที่เวลา 180 1,500 และ 1,860 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับที่มีความยาวคอลัมน์ต่างๆ พบว่า EBCT และปริมาตรของสารละลายที่ผ่านคอลัมน์จนถึงจุดเบรกทรู (V_b) มีค่ามากขึ้น ขณะที่อัตราการใช้วัสดุดูดซับมีค่าน้อยลงเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษาเบรกทรูการดูดซับฟลูออไรด์ โดยแสดงค่าดังกล่าวตามตารางที่ 4-11 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับ GAC แสดงดังรูปที่ 4-28



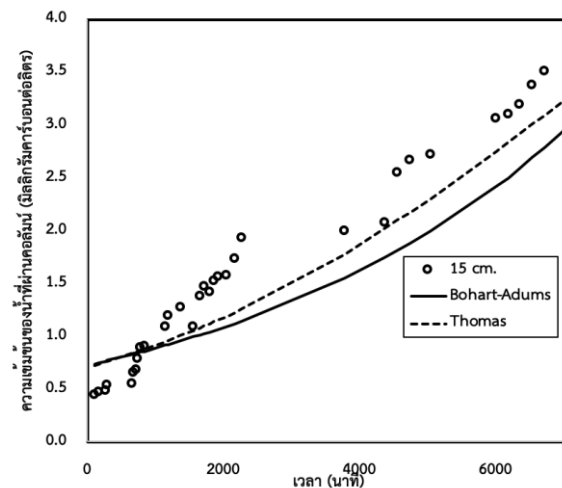
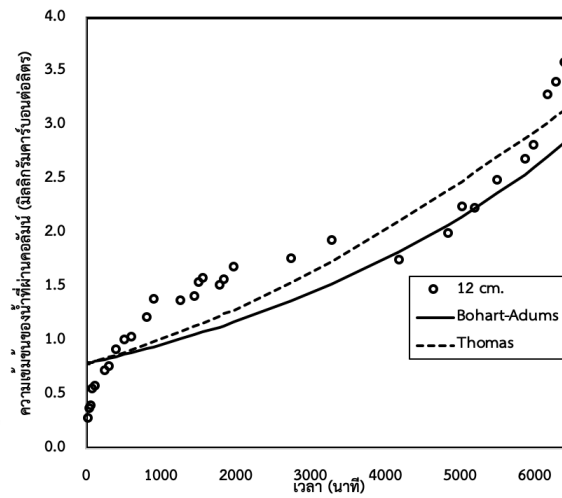
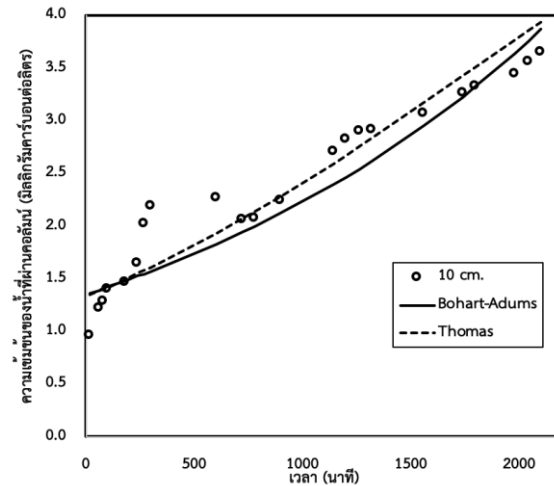
รูปที่ 4-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้วัสดุดูดซับ GAC (น้ำสังเคราะห์ DOC จากถ่านกระดูก ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4-11 ค่า EBCT และ อัตราการใช้วัสดุดูดซับ GAC

พารามิเตอร์	ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ (เซนติเมตร)		
	10	12	15
น้ำหนักวัสดุดูดซับ (g)	10.76	13.63	17.19
ปริมาตรของชั้นวัสดุดูดซับ (cm ³)	31.40	37.68	47.10
เวลาที่จุดเบรคทฤษฎี (min)	180	1500	1860
ปริมาตรของสารละลายที่ผ่าน	0.83	6.90	8.56
คอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดเบรคทฤษฎี (l)			
EBCT (min)	6.83	8.19	10.24
อัตราการใช้วัสดุดูดซับ (g/l)	12.99	1.98	2.01

นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลกราฟเบรคทฤษฎีที่ได้มาพิจารณาความเข้ากันได้กับกับแบบจำลองทั้งแบบจำลองของโบฮาร์ทและอดัมและแบบจำลองของโทมัส พบว่า วัสดุดูดซับ GAC มีการดูดซับแบบคอลัมน์สอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส โดยพิจารณาจากค่า R^2 และเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ในแบบจำลองของโทมัสที่มีค่า R^2 มากกว่า 0.92 พบว่าเมื่อความสูงของชั้นวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราเร็วของโทมัส (k_{TH}) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษากราฟเบรคทฤษฎีการดูดซับ

ฟลูออไรด์ โดยกราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับในระบบคอลัมน์และค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของระบบคอลัมน์ที่ความสูงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-29 และตารางที่ 4-12 ตามลำดับ



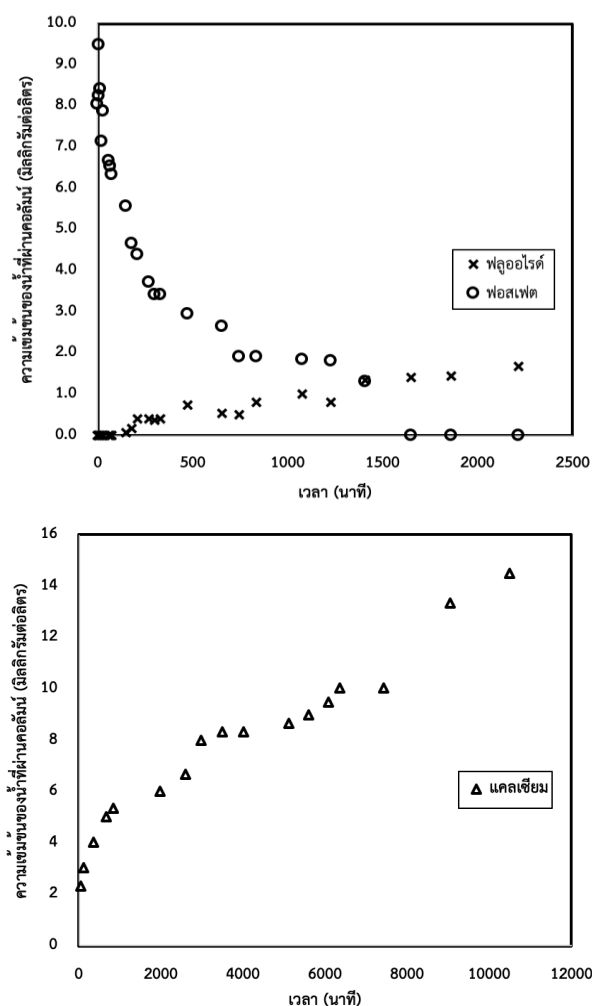
รูปที่ 4-29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์ที่มีความสูงของวัสดุดูดซับ GAC 10 12 และ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-12 ค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของระบบคอลัมน์ที่มีความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ GAC ต่างๆ

แบบจำลอง	ค่าคงที่	ความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ (เซนติเมตร)		
		8	12	15
โบฮาร์ทและอดัม	k_{AB} (L/mg.min)	6.99×10^{-5}	3.06×10^{-5}	3.08×10^{-5}
	N_0 (mg/l)	3495	8425	6922
	R^2	0.905	0.888	0.931
โทมัส	k_{Th} (L/mg.min)	1.12×10^{-4}	4.60×10^{-5}	4.63×10^{-5}
	q_0 (mg/l)	5.65	14.67	12.17
	R^2	0.928	0.886	0.945

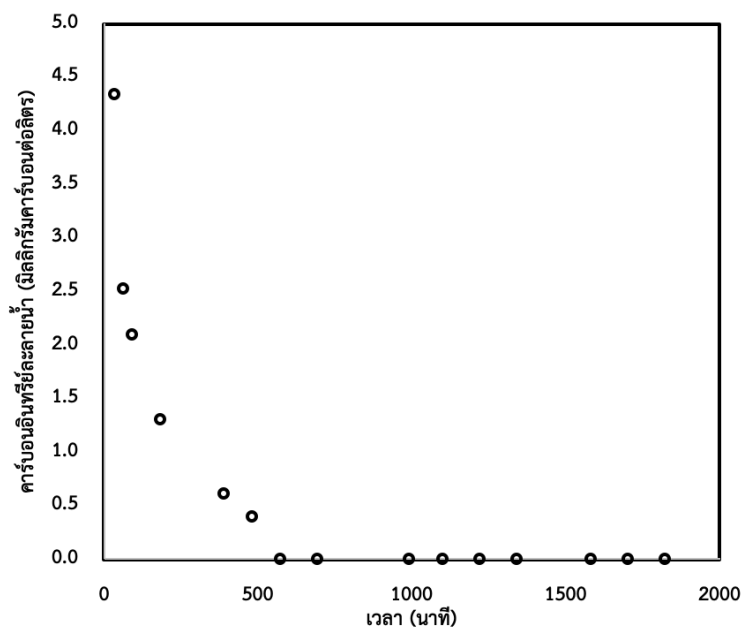
4.4.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์แบบที่ละเท้างต้น ทำให้ทราบชนิดของไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนคือ ฟลูออไรด์ ฟอสเฟต และแคลเซียม ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์นี้ จึงสนใจเฉพาะกลุ่มไอออนดังกล่าว โดยใช้น้ำตัวอย่างจากการศึกษากราฟเบรกทรูที่คอลัมน์ความยาวต่างๆ ทั้งนี้การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟลูออไรด์และฟอสเฟตจะเก็บตัวอย่างจากคอลัมน์ความยาวที่ 12 เซนติเมตร และการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมจะเก็บตัวอย่างจากคอลัมน์ความยาวที่ 15 เซนติเมตร ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนต่างๆที่ผ่านระบบคอลัมน์กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4-30



4.4.3 การศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

การปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์ ใช้น้ำตัวอย่างจากการศึกษากราฟ เบรคทูลูออไรด์ที่คอลัมน์ความยาว 12 เซนติเมตร โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ผ่านระบบคอลัมน์กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4-31



รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำที่ผ่านระบบ คอลัมน์ยาว 12 เซนติเมตรกับเวลา

(น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลอง พบว่าในช่วงต้นของการเดินระบบคอลัมน์จะมีความเข้มข้น DOC ออกมา สูงที่สุดที่ 4.33 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร และลดต่ำลงเรื่อยๆจนกระทั่งความเข้มข้น DOC เป็นศูนย์ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 500 นาที ทั้งนี้ความเข้มข้น DOC ที่ออกมาเป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับ ฟลูออไรด์ กล่าวคือฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายจะถูกกำจัดพร้อมกับการปลดปล่อย DOC จากวัสดุ ดูดซับออกมาสู่สารละลาย ทั้งนี้การปลดปล่อย DOC จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ ฟลูออไรด์ (Sawangjang, 2015)

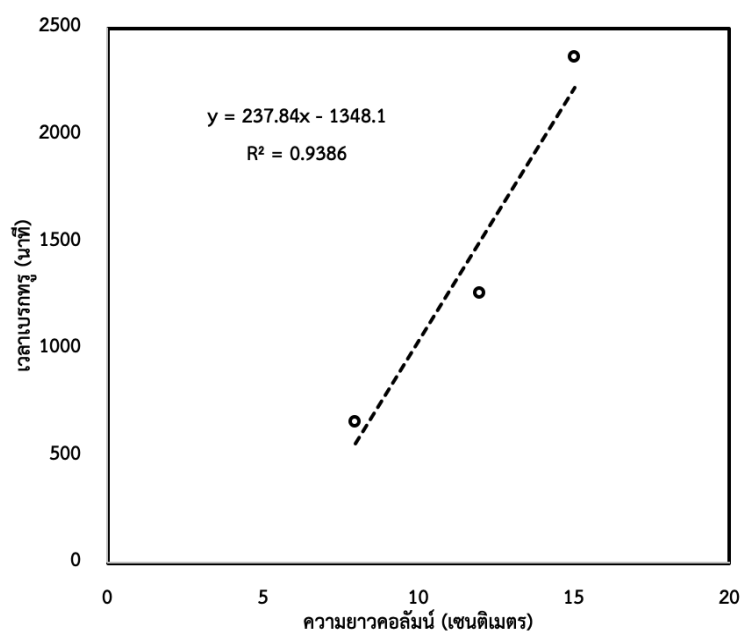
4.4.4 การศึกษาการออกแบบระบบคอลัมน์

การออกแบบระบบคอลัมน์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับคาร์บอน อินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC กำหนดให้ความเข้มข้นฟลูออไรด์และคาร์บอนอินทรีย์ละลาย น้ำเริ่มต้น 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 6.7 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นฟลูออไรด์

และคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำเบรกทูล 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1.5 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ตามลำดับ อัตราการไหล 4.6 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเบรกทูล 1440 นาที

4.4.4.1 การออกแบบคอลัมน์การดูดซับฟลูออไรด์

จากผลการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC ในระบบคอลัมน์สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูล แสดงดังรูปที่ 4-32 และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทูลของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้ค่าคงที่ของสมการตามตารางที่ 4-13



รูปที่ 4-32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูลในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC ในระบบคอลัมน์

(น้ำบาดาลจริง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.3 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

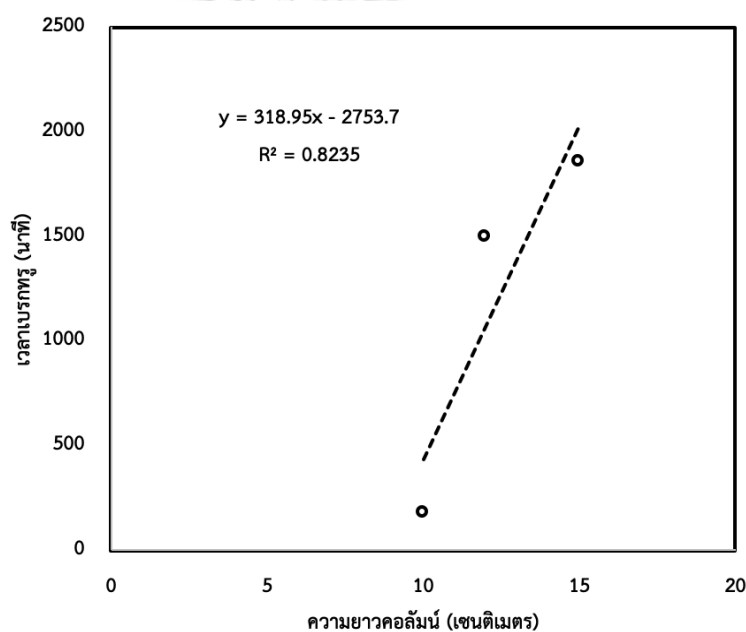
ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC

พารามิเตอร์				ค่าคงที่		R ²
C ₀	C _B	V	k	N ₀	D ₀	
(mg/l)	(mg/l)	(cm/min)	(ml/mg.min)	(mg/ml)	(cm.)	
3.8	0.7	1.465	0.000290	1,324.06	5.91	0.939

จากการคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์ พบว่าเมื่อกำหนดเวลาเบรกทรูที่ 1,440 นาทีจะได้ความยาวคอลัมน์ 11.72 เซนติเมตร จึงเลือกใช้ความยาวคอลัมน์ที่ 11.8 เซนติเมตร และเมื่อคำนวณกลับโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้เวลาเบรกทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ 1,458 นาที

4.4.4.2 การออกแบบคอลัมน์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ

จากผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC ในระบบคอลัมน์สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทรู แสดงดังรูปที่ 4-33 และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้ค่าคงที่ของสมการตามตารางที่ 4-14



รูปที่ 4-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทรูในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC ในระบบคอลัมน์

(น้ำสังเคราะห์ DOC จากถ่านกระดุก ค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4-14 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC

พารามิเตอร์	ค่าคงที่
-------------	----------

C_0 (mg/l)	C_B (mg/l)	V (cm/min)	k (ml/mg.min)	N_0 (mg/ml)	D_0 (cm.)	R^2
6.8	1.5	1.465	0.000067	3,117.38	8.63	0.824

จากการคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์ พบว่าเมื่อกำหนดเวลาเบรกทรูที่ 1,440 นาทีจะได้ความยาวคอลัมน์ 13.14 เซนติเมตร จึงเลือกใช้ความยาวคอลัมน์ที่ 13.2 เซนติเมตร และเมื่อคำนวณกลับโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้เวลาเบรกทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ 1,456 นาที

4.4.4.3 การออกแบบระบบคอลัมน์ใหม่ที่มีคุณสมบัติเหมือนระบบคอลัมน์เดิม

หลังจากที่ได้สมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ของระบบคอลัมน์การดูดซับข้างต้นแล้ว สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบคอลัมน์ใหม่ที่มีคุณสมบัติเหมือนคอลัมน์เดิม โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบและ/หรือเปลี่ยนความเข้มข้นเบรกทรูของระบบ โดยจัดรูปของสมการให้อยู่ในรูปสมการกราฟเส้นตรงดังสมการที่ 4.4

$$t = ax + b \quad (4.4)$$

และเมื่อจัดสมการการออกแบบคอลัมน์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC ให้อยู่ในรูปของสมการข้างต้น จะได้ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

$$t = 237.84x - 1348.1 \quad (4.5)$$

$$t = 318.95x - 2753.7 \quad (4.6)$$

โดยที่ t คือ ระยะเวลาใช้งานคอลัมน์ (นาที) x คือความลึกของชั้นตัวดูดซับ (เซนติเมตร) a คือ ความชันของกราฟเส้นตรง (นาทีต่อเซนติเมตร) และ b คือ จุดตัดแกน y ของกราฟเส้นตรง

สำหรับกรณีที่ต้องการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ หรือเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ หรือเปลี่ยนทั้งความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบและความเข้มข้นเบรกทรูของระบบ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการไหล ความเข้มข้นของ

สารละลาย และความเข้มข้นเบรกทรูในระบบเดิมและระบบใหม่ได้ ดังสมการที่ 4.7 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

กรณีที่มีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ

$$a' = a \left(\frac{V}{V'} \right) \quad (4.7)$$

กรณีที่มีการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ

$$a' = a \left(\frac{C_0}{C_1} \right) \quad (4.8)$$

กรณีที่มีการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบและความเข้มข้นเบรกทรูของระบบ

$$b' = b \left(\frac{C_0}{C_1} \right) \left(\frac{\ln[(C_1/C_F)-1]}{\ln[(C_0/C_B)-1]} \right) \quad (4.9)$$

โดยที่ C_0 และ C_1 คือความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบเดิมและใหม่ ตามลำดับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V และ V' คืออัตราเร็วการไหลของสารละลายในระบบเดิมและใหม่ ตามลำดับ (เซนติเมตรต่อนาทีก) และ C_B และ C_F คือความเข้มข้นเบรกทรูของระบบเดิมและใหม่ ตามลำดับ

ระบบประปาแบบกรองช้าของหมู่บ้านบ้านใหม่ในฝัน ตำบลสะเนียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน มีอัตราการไหลที่ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พื้นที่หน้าตัดถังกรองขนาด 1.21 ตารางเมตร และเดินระบบประมาณ 4 ชั่วโมงต่อวัน เมื่อนำค่าที่ได้มาเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วการไหลของสารละลายในระบบคอลัมน์ใหม่ แล้วนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.7 จะได้รูปแบบสมการของระบบคอลัมน์ใหม่สำหรับการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC แสดงดังสมการที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

$$t = 505.92x - 1348.1 \quad (4.10)$$

$$t = 678.45x - 2753.7 \quad (4.11)$$

ดังนั้น เมื่อกำหนดความสูงของวัสดุดูดซับ BC และ GAC เท่ากับ 75 และ 25 เซนติเมตร ตามลำดับ จะได้ปริมาณวัสดุดูดซับ BC และ GAC ที่ต้องใช้ 0.9 และ 0.3 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

และระยะเวลาในการเดินระบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงความเข้มข้นเบรกทรูสำหรับการดูดซับฟลูออไรด์
ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC เท่ากับ 153 และ 60 วัน ตามลำดับ



บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ถ่านกระดูกธรรมชาติและถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ จากนั้นเลือกวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาทำการศึกษาภายใต้ระบบแบบทีละเท โดยศึกษาทั้งสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ จลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ และการเปลี่ยนแปลงของไอออนบวกและลบ นอกจากนี้ยังศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำจากถ่านกระดูกด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด รวมทั้งศึกษากระบวนการดูดซับภายใต้ระบบคอลัมน์ โดยศึกษาทั้งกราฟเบรททิงของชั้นวัสดุดูดซับที่ความยาวคอลัมน์ต่างๆ การเปลี่ยนแปลงของไอออนบวกและลบ การปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ และการออกแบบคอลัมน์

5.1.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ พบว่าโครงสร้างวัสดุดูดซับทุกชนิดมีรูปแบบ XRD สอดคล้องกับรูปแบบมาตรฐานของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) โดยได้รับการยืนยันการมีอยู่ของสาร HAP ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ทั้งนี้วัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีทั้ง BC-KOH BC-NaOH และ BC-KOH/NaOH มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์น้อยกว่าวัสดุดูดซับ BC เนื่องจากมีรูปแบบโครงสร้างผลึกของสาร HAP และปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับ BC แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีทำให้วัสดุดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ลดลง

5.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ BC

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ BC เพิ่มเติม พบว่าโครงสร้างของวัสดุดูดซับ BC ได้รับการยืนยันการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันของสาร HAP ด้วย FT-IR ขณะที่ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุดูดซับ พบว่ามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดีในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำ และความสามารถในการคายซับ DOC ของวัสดุดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสอง โดยมีความสามารถในการคายซับลดลงเมื่อปริมาณวัสดุดูดซับเพิ่มมากขึ้น

5.1.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการอันดับหนึ่งเหมือน อันดับที่สองเหมือน และ สมการริชชี พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเหมือน ในส่วนวัสดุดูดซับ GAC ไม่เกิดการดูดซับขึ้น ขณะที่จลนพลศาสตร์การดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับสองเหมือน สำหรับกลไกการแพร่กระจายของ Intraparticle ของฟลูออไรด์บนวัสดุดูดซับ BC และ DOC บนวัสดุดูดซับ GAC พบกลไกการดูดซับเกิดขึ้นทั้งสามขั้นตอน โดยขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วในการดูดซับ

5.1.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่ามีเพียงวัสดุดูดซับ BC เท่านั้นที่เกิดการดูดซับขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยวัสดุดูดซับ BC มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดเท่ากับ 2.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 8.12 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง ฟรันทซ์ลิช และเรดลิชและปีเตอร์สัน ตามลำดับ ขณะที่ไอโซเทอมการดูดซับ DOC พบว่าวัสดุดูดซับ GAC มีความสามารถในการดูดซับ DOC สูงสุดเท่ากับ 2.30 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นสมดุล 4.48 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับ DOC สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง เรดลิชและปีเตอร์สัน และฟรันทซ์ลิช ตามลำดับ

5.1.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบที่ละเท

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบที่ละเท พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นทั้งไอออนบวกและลบ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของไอออนที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าร้อยละ 50 ได้แก่ ความเข้มข้นฟลูออไรด์ ฟอสเฟต และแคลเซียม โดยค่าพีเอชของสารละลายยังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ลดลงอาจเกิดจาก 2 กลไกหลักคือ การแลกเปลี่ยนไอออนและการตกตะกอน โดยการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของค่าพีเอชของสารละลายเป็นผลมาจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมา ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากรูปแบบของแคลเซียมฟอสเฟตที่อยู่ในวัสดุดูดซับมีหลายรูปแบบ ทำให้ฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมที่อยู่ภายในวัสดุดูดซับ และปลดปล่อยฟอสเฟตไอออนที่อยู่ภายในวัสดุดูดซับออกมาสู่สารละลาย สำหรับความเข้มข้นของ

แคลเซียมที่ลดลงอาจเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมไอออนเดิมที่มีอยู่ในสารละลายกับฟอสเฟตไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายลดลง

5.1.6 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์

จากการศึกษาการศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์ พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ ส่งผลให้เวลาที่จุดเบรคทROUGHเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่อัตราการใช้วัสดุดูดซับลดลงแสดงให้เห็นว่าเกิดการใช้วัสดุดูดซับได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด โดยกราฟเบรคทROUGHที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัส

5.1.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ในระบบคอลัมน์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของไอออนทั้งฟลูออไรด์ ฟอสเฟต และแคลเซียมมีความสัมพันธ์กันโดยตรง โดยเมื่อระยะเวลาผ่านไปความเข้มข้นของฟลูออไรด์และแคลเซียมจะเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลง

5.1.8 การศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์

จากการศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำในระบบคอลัมน์ พบว่าในช่วงต้นของการเดินระบบคอลัมน์จะมีความเข้มข้น DOC ออกมาสูงที่สุด และลดต่ำเรื่อยๆตามระยะเวลา ทั้งนี้ความเข้มข้น DOC ที่ออกมาเป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์

5.1.9 การศึกษาการออกแบบคอลัมน์

จากการการศึกษาการออกแบบคอลัมน์ พบว่าการออกแบบด้วยสมการเบรคทROUGHของโบฮาร์ทและอดัมส์สามารถทำได้ โดยสมการการออกแบบคอลัมน์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC คือ $t = 237.84X - 1348.1$ และ $t = 318.95X - 2753.7$ ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วการไหลของสารละลายเพื่อให้สอดคล้องกับระบบคอลัมน์จริงจะได้สมการใหม่สำหรับการออกแบบคอลัมน์การดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC และการดูดซับ DOC ด้วยวัสดุดูดซับ GAC คือ $t = 505.92X - 1348.1$ และ $t = 678.45X - 2753.7$ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำและไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดอื่นๆ
2. ศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีเพิ่มเติม เช่น การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นต้น
3. ศึกษาผลกระทบของการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับ BC ต่อความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์
4. ศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับ BC ภายหลังจากกระบวนการดูดซับ
5. ศึกษาผลกระทบของเชื้อโรคต่างๆที่อาจมาจากการใช้วัสดุดูดซับ BC เช่น E-Coli
6. ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ และ DOC ในระบบคอลัมน์ที่มีการผสมวัสดุดูดซับทั้ง BC และ GAC
7. ศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำ



บรรณานุกรม

- Asgari, G., Akbari, S., Mohammadi, A. M. S., Poormohammadi, A. & Ramavandi, B. 2017. Preparation and catalytic activity of bone-char ash decorated with MgO-FeNO₃ for ozonation of reactive black 5 dye from aqueous solution: Taguchi optimization data. *Data in brief* 13: 132-136.
- Babu, A. N., Reddy, D. S., Kumar, G. S., Ravindhranath, K. & Mohan, G. K. 2018. Removal of lead and fluoride from contaminated water using exhausted coffee grounds based bio-sorbent. Journal of environmental management 218: 602-612.
- Bhaumik, R., Mondal, N., Das, B., Roy, P., Pal, K., Das, C. & Baneerjee, A. 2012. Eggshell powder as an adsorbent for removal of fluoride from aqueous solution: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. Journal of Chemistry 9(3): 1457-1480.
- Bhaumik, R. & Mondal, N. K. 2015. Adsorption of fluoride from aqueous solution by a new low-cost adsorbent: thermally and chemically activated coconut fibre dust. Clean Technologies and Environmental Policy 17(8): 2157-2172.
- Bhaumik, R. & Mondal, N. K. 2016. Optimizing adsorption of fluoride from water by modified banana peel dust using response surface modelling approach. Applied Water Science 6(2): 115-135.
- Chantanavorakunchai, N., 2019. ADSORPTION OF NONSTEROIDAL ANTI-INFLAMMATORY DRUGS IN THE PRESENCE OF DISSOLVED ORGANIC MATTER BY FUNCTIONALIZED MIL-53(AI) Thesis Master Environmental Engineering Chulalongkorn
- Chuah, C. J., Lye, H. R., Ziegler, A. D., Wood, S. H., Kongpun, C. & Rajchagool, S. 2016. Fluoride: a naturally-occurring health hazard in drinking-water resources of Northern Thailand. Science of the Total Environment 545: 266-279.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. & Tchobanoglous, G., 2012. MWH's water treatment: principles and design. John Wiley & Sons.
- Flores-Cano, J. V., Leyva-Ramos, R., Carrasco-Marin, F., Aragón-Piña, A., Salazar-Rabago, J. & Leyva-Ramos, S. 2016. Adsorption mechanism of Chromium (III) from water solution on bone char: effect of operating conditions. Adsorption 22(3): 297-308.

- Gibert, O., Lefèvre, B., Fernández, M., Bernat, X., Paraira, M. & Pons, M. 2013. Fractionation and removal of dissolved organic carbon in a full-scale granular activated carbon filter used for drinking water production. Water research 47(8): 2821-2829.
- Goswami, R. & Kumar, M. 2017. Removal of fluoride from aqueous solution using nanoscale rice husk biochar. Groundwater for Sustainable Development.
- Greenwood, J., Rainey, T. & Doherty, W. O. 2007. Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions. Journal of colloid and interface science 306(1): 66-71.
- Haynes, W. M., 2014. CRC handbook of chemistry and physics. CRC press.
- Iriarte-Velasco, U., Ayastuy, J., Zudaire, L. & Sierra, I. J. C. E. J. 2014. An insight into the reactions occurring during the chemical activation of bone char. 251: 217-227.
- Ismail, Z. Z. & AbdelKareem, H. N. 2015. Sustainable approach for recycling waste lamb and chicken bones for fluoride removal from water followed by reusing fluoride-bearing waste in concrete. Waste management 45: 66-75.
- Jadhav, S. V., Bringas, E., Yadav, G. D., Rathod, V. K., Ortiz, I. & Marathe, K. V. 2015. Arsenic and fluoride contaminated groundwaters: a review of current technologies for contaminants removal. Journal of Environmental Management 162: 306-325.
- Kashi, G., Mehree, A., Zaeimdar, M., Khoshab, F. & Madaree, A. M. 2015. Removal of fluoride from urban drinking water by eggshell powder. BULGARIAN CHEMICAL COMMUNICATIONS 47: 187-192.
- Laonapakul, T., Sutthi, N., Pranudta, A. & Padungthon, S. 2019. การลดฟลูออไรด์ในน้ำโดยใช้ กระดุกวัว และก้างปลา. Farm Engineering and Automation Technology Journal 5(1): 49-57.
- Lawrinenko, M. & Laird, D. A. 2015. Anion exchange capacity of biochar. Green Chemistry 17(9): 4628-4636.
- Lupo, M., Lombarte, M., Fina, B. L. & Rigalli, A. 2015. DEVELOPMENT OF A HOUSEHOLD METHOD FOR TREATMENT OF HIGHLY FLUORIDATED WATER USING PROCESSED EGGHELL. ACTUALIZACIONES EN OSTEOLOGIA 11(3): 209-219.
- Matilainen, A., Vieno, N. & Tuhkanen, T. 2006. Efficiency of the activated carbon

- filtration in the natural organic matter removal. Environment international 32(3): 324-331.
- Medellin-Castillo, N., Leyva-Ramos, R., Padilla-Ortega, E., Perez, R. O., Flores-Cano, J. & Berber-Mendoza, M. 2014. Adsorption capacity of bone char for removing fluoride from water solution. Role of hydroxyapatite content, adsorption mechanism and competing anions. Journal of industrial and Engineering Chemistry 20(6): 4014-4021.
- Medellin-Castillo, N. A., Padilla-Ortega, E., Tovar-García, L. D., Leyva-Ramos, R., Ocampo-Pérez, R., Carrasco-Marín, F. & Berber-Mendoza, M. S. 2016. Removal of fluoride from aqueous solution using acid and thermally treated bone char. Adsorption 22(7): 951-961.
- Mendoza-Castillo, D. I., Bonilla-Petriciolet, A. & Jáuregui-Rincón, J. 2015. On the importance of surface chemistry and composition of bone char for the sorption of heavy metals from aqueous solution. Desalination and Water Treatment 54(6): 1651-1662.
- Mutchimadilok, Y., Smittakorn, S., Mongkolnchai-arunya, S. & Durnford, D. 2014. Defluoridation with locally produced Thai bone char. Advances in Environmental Chemistry 2014.
- Namkaew, M. & Wiwatanadate, P. 2012. Association of fluoride in water for consumption and chronic pain of body parts in residents of San Kamphaeng district, Chiang Mai, Thailand. Tropical Medicine & International Health 17(9): 1171-1176.
- Pagano, T., Bida, M. & Kenny, J. E. 2014. Trends in levels of allochthonous dissolved organic carbon in natural water: a review of potential mechanisms under a changing climate. Water 6(10): 2862-2897.
- Park, M., Choi, C. L., Lim, W. T., Kim, M. C., Choi, J. & Heo, N. H. 2000. Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials: II. Characterization of zeolitic materials. Microporous and Mesoporous Materials 37(1-2): 91-98.
- Parmar, H. S., Patel, J. B., Sudhakar, P. & Koshy, V. 2006. Removal of fluoride from water with powdered corn cobs. Journal of environmental science & engineering 48(2): 135-138.

- Rojas-Mayorga, C., Bonilla-Petriciolet, A., Aguayo-Villarreal, I. A., Hernandez-Montoya, V., Moreno-Virgen, M., Tovar-Gómez, R. & Montes-Morán, M. 2013. Optimization of pyrolysis conditions and adsorption properties of bone char for fluoride removal from water. Journal of analytical and applied pyrolysis 104: 10-18.
- Sawangjang, B., 2015. Adsorption mechanism of bone chars for defluoridation of groundwater. Chulalongkorn University
- Shahid, M. K., Kim, J. Y. & Choi, Y.-G. 2019. Synthesis of bone char from cattle bones and its application for fluoride removal from the contaminated water. Groundwater for Sustainable Development 8: 324-331.
- Shang, H., Lu, Y., Zhao, F., Chao, C., Zhang, B. & Zhang, H. 2015. Preparing high surface area porous carbon from biomass by carbonization in a molten salt medium. RSC Advances 5(92): 75728-75734.
- Sharma, D., Singh, A., Verma, K., Paliwal, S., Sharma, S. & Dwivedi, J. 2017. Fluoride: a review of pre-clinical and clinical studies. Environmental toxicology and pharmacology.
- Shivayogimath, C., Hiremath, M. & Lokeshappa. 2014. Batch adsorption of fluoride using low cost adsorbents prepared from corncob and Acacia nilotica stalk by KOH activation. Lokeshappa International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) 3(6).
- Sounthararajah, D. P., Loganathan, P., Kandasamy, J. & Vigneswaran, S. 2016. Column studies on the removal of dissolved organic carbon, turbidity and heavy metals from stormwater using granular activated carbon. Desalination and Water Treatment 57(11): 5045-5055.
- Tahir, M. & Rasheed, H. 2013. Fluoride in the drinking water of Pakistan and the possible risk of crippling fluorosis. Drinking Water Engineering and Science 6(1): 17-23.
- Talat, M., Mohan, S., Dixit, V., Singh, D. K., Hasan, S. H. & Srivastava, O. N. 2018. Effective removal of fluoride from water by coconut husk activated carbon in fixed bed column: Experimental and breakthrough curves analysis. Groundwater for Sustainable Development 7: 48-55.
- Tirkey, P., Bhattacharya, T. & Chakraborty, S. 2018. Optimization of fluoride removal from aqueous solution using Jamun (*Syzygium cumini*) leaf ash. Process Safety

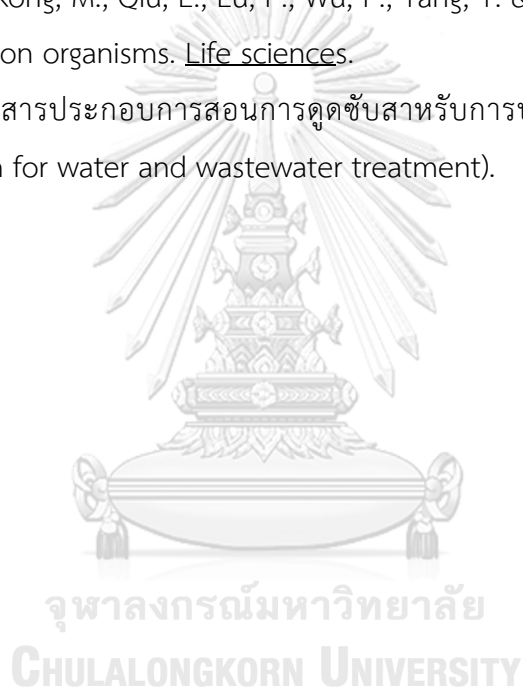
and Environmental Protection 115: 125-138.

Wang, Q., Zhou, M., Zhang, Y., Liu, M., Xiong, W. & Liu, S. 2018. Large surface area porous carbon materials synthesized by direct carbonization of banana peel and citrate salts for use as high-performance supercapacitors. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29(5): 4294-4300.

Yadav, A. K., Abbassi, R., Gupta, A. & Dadashzadeh, M. 2013. Removal of fluoride from aqueous solution and groundwater by wheat straw, sawdust and activated bagasse carbon of sugarcane. Ecological engineering 52: 211-218.

Zuo, H., Chen, L., Kong, M., Qiu, L., Lü, P., Wu, P., Yang, Y. & Chen, K. 2018. Toxic effects of fluoride on organisms. Life sciences.

ปฎิภาณ, 2014. เอกสารประกอบการสอนการดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียและผลิตน้ำประปา (Adsorption for water and wastewater treatment).





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนลบชนิดต่างๆ ทั้งฟลูออไรด์ คลอไรด์ ซัลเฟต ฟอสเฟต และโบรไมด์ โดยเครื่อง Ion Chromatography

เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Ion Chromatography
2. สารละลายมาตรฐานไอออนลบรวม (Fluoride, Chloride, Bromide, Nitrate, Phosphate, Sulfate) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. น้ำปราศจากไอออน 18.2 ไมโครซีเมนต์ (DI water)
4. ไมโครปิเปต (Micro pipette)
5. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 6.3 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. โซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)

เจือจางสารละลายมาตรฐานไอออนลบรวมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 2 4 6 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรในขวดวัดปริมาตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ตามสมการด้านล่างนี้

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายมาตรฐานไอออนลบรวมที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

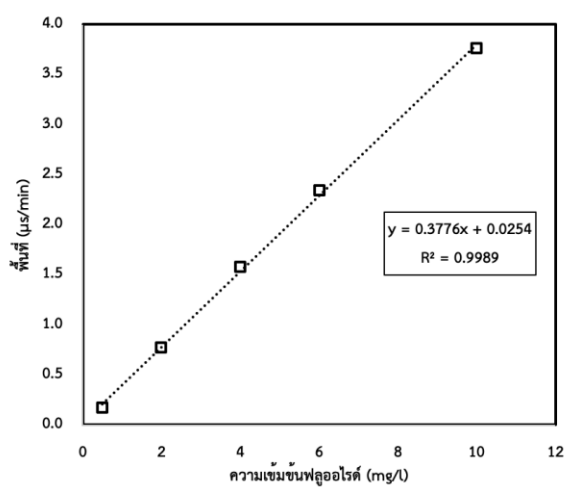
$$(100 \text{ mg/l})V_1 = (2 \text{ mg/l})(100 \text{ ml})$$

$$V_1 = 2 \text{ ml}$$

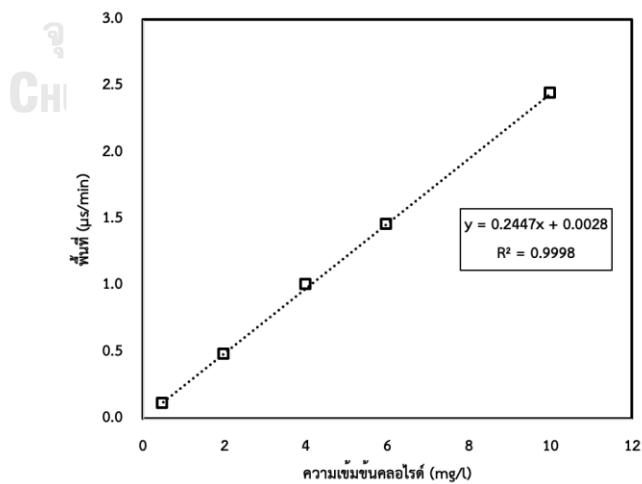
หลังจากนั้นทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานไอออนลบรวมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรและปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยน้ำปราศจากไอออน แสดงดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอออนลบรวม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ใช้ในการเตรียมความเข้มข้นมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ

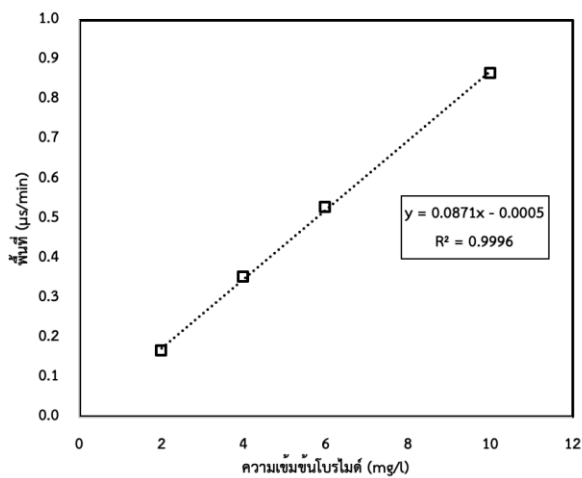
ความเข้มข้นไอออนลบรวม (mg/l)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐาน 100 ppm (ml)
2	2
4	4
6	6
10	10



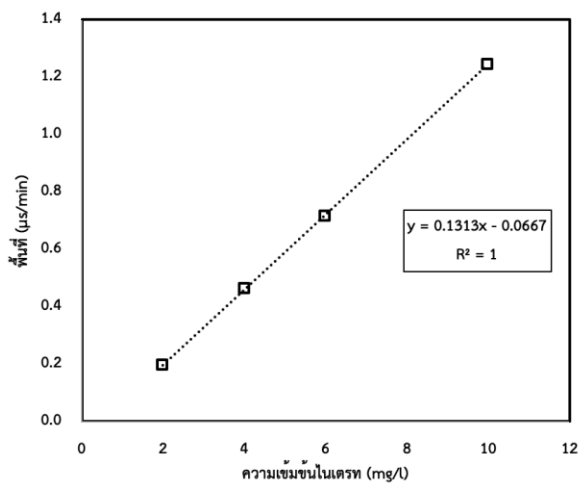
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นฟลูออไรด์



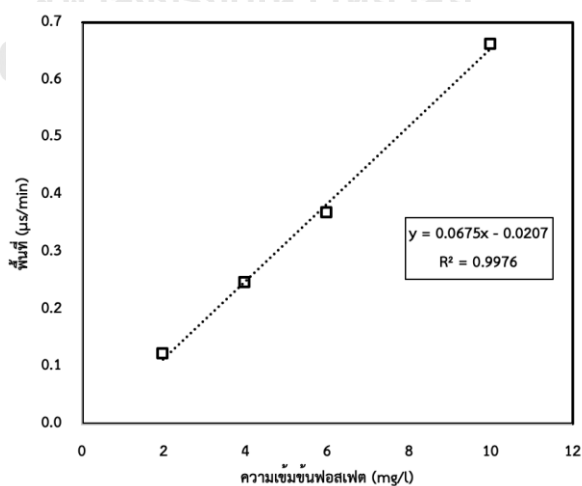
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นคลอไรด์



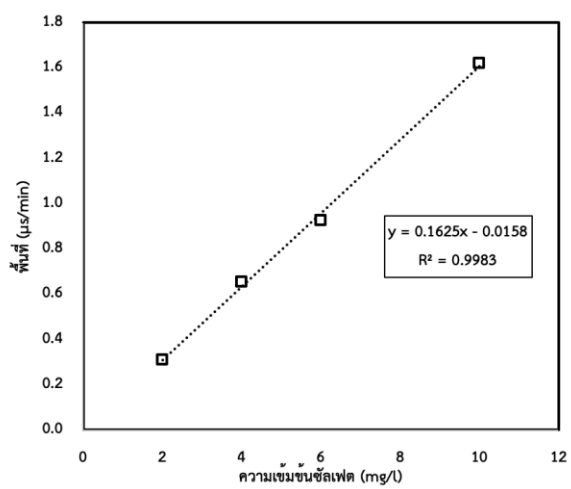
รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นโบรไมต์



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นไนเตรท



รูปที่ ก-5 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นฟอสเฟต



รูปที่ ก-6 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นคลอโรฟิลล์





ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ	ความเข้มข้นฟลูออไรด์คงเหลือ (mg/l)					ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.	
BC	0.58	0.63	0.62	0.61	0.03	69.5
BC-KOH	1.33	1.31	1.36	1.33	0.03	33.3
BC-NaOH	1.43	1.51	1.44	1.46	0.04	27.0
BC-KOH/NaOH	1.60	1.61	1.66	1.62	0.03	18.8

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการวิเคราะห์ความเป็นประจุของวัสดุดูดซับ BC

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชสุดท้าย	ผลต่างค่าพีเอช
2.00	5.23	-3.23
4.00	7.50	-3.50
5.97	7.43	-1.46
7.67	7.73	-0.06
10.00	7.82	2.18
12.00	11.61	0.39

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำของวัสดุดูดซับ BC

เวลา (min)	q _t (mg/g)
6	0.065
8	0.120
45	0.119
60	0.131
180	0.141

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของวัสดุดูดซับ BC

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นโบรมัดคงเหลือ (mg/l)					ความเข้มข้นโบรมัด (mmol/kg)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.	
4	1.814	1.618	1.514	1.649	0.152	20.61
6	0.521	0.423	0.412	0.452	0.060	5.65
8	0.288	0.303	0.335	0.309	0.024	3.86

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ BC และ GAC

BC		GAC	
เวลา (min)	q_t (mg/g)	เวลา (min)	q_t (mg/g)
2	0.221	2	0
4	0.243	4	0
6	0.271	6	0
8	0.333	8	0
10	0.374	10	0
30	0.532	30	0
45	0.548	45	0
60	0.725	60	0
90	0.759	90	0
120	0.812	120	0
240	1.032	240	0
300	1.108	300	0
360	1.130	360	0

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำของวัสดุดูดซับ GAC

เวลา (min)	q_t (mg/g)
2	0.009
4	0.279
6	0.337
8	0.453
10	0.491
15	0.601
20	0.655
25	0.713
30	0.762
60	0.788
90	0.824
120	0.863
180	0.869

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ BC และ GAC

C ₀ (mg/l)	BC					GAC		
	C _e (mg/l)					q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	q _e (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.			
1.773	0.738	0.768	0.810	0.772	0.036	0.501	1.773	0
3.402	1.652	1.662	1.722	1.678	0.038	0.862	3.402	0
6.005	3.133	3.276	3.369	3.259	0.119	1.373	6.005	0
8.564	5.126	5.237	4.966	5.110	0.136	1.727	8.564	0
10.817	6.821	6.830	6.592	6.747	0.135	2.035	10.817	0

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำของวัสดุดูดซับ GAC

C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)			q _e (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
3.060	1.161	1.039	1.100	0.392
5.613	1.671	1.795	1.733	0.776
8.106	2.599	2.493	2.546	1.112
11.530	3.099	3.294	3.197	1.667
12.990	3.931	4.003	3.967	1.805

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC

ชนิดไอออน	ความเข้มข้นไอออน	ความเข้มข้นไอออนสุดท้าย (mg/l)				
	เริ่มต้น (mg/l)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.
ฟลูออไรด์	3.820	1.580	1.650	1.610	1.613	0.035
คลอไรด์	5.299	4.351	4.500	4.556	4.469	0.106
ฟอสเฟต	0.000	1.847	1.264	1.837	1.649	0.334
ซัลเฟต	1.546	1.895	1.342	1.518	1.585	0.283
แคลเซียม	10.100	1.430	1.850	2.000	1.760	0.295
แมกนีเซียม	5.020	4.200	4.430	4.300	4.310	0.115
โพแทสเซียม	1.110	1.100	1.120	1.090	1.103	0.015
โซเดียม	119.000	109.000	120.000	119.000	116.000	6.083



ตารางที่ ค-1 ข้อมูลการศึกษาเบรคทรูการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC

ความสูงชั้น BC (cm.)					
8 cm.		12 cm.		15 cm.	
เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)
70	0.40	510	0.30	750	0.26
80	0.41	540	0.30	810	0.27
180	0.40	570	0.30	870	0.28
210	0.40	600	0.36	930	0.30
240	0.42	660	0.38	990	0.32
270	0.49	720	0.44	1220	0.33
300	0.49	780	0.45	1400	0.36
360	0.51	840	0.49	1520	0.36
390	0.54	900	0.56	1580	0.37
420	0.59	960	0.60	1640	0.40
450	0.60	1020	0.65	2000	0.39
660	0.71	1260	0.67	2120	0.44
690	0.77	1320	0.76	2180	0.49
720	0.78	1680	0.84	2240	0.51
810	0.85	1800	1.08	2300	0.60
1020	0.82	2280	0.96	2360	0.68
1230	0.89	2400	1.19	2420	0.73
1290	1.05	2520	1.29	2480	0.76
1350	1.20	3000	1.52	2840	0.79
1410	1.28	3750	1.45	3200	0.80
1470	1.43	3870	1.64	3380	0.92
1530	1.48	4470	1.79	3800	1.06
1590	1.58	5550	1.76	4040	1.14
1650	1.67	6150	1.90	4160	1.23
1710	1.65	6330	1.82	4520	1.34
1980	1.70	6720	1.95	4820	1.56
2490	1.98	7020	1.99	5000	1.79
2730	2.04	7620	2.16	5240	1.84
2850	2.22	7740	2.30	5480	1.88
3240	2.08	7830	2.30	5600	1.93

ความสูงชั้น BC (cm.)					
8 cm.		12 cm.		15 cm.	
เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)
3360	2.22	8010	2.06	5960	1.99
4550	2.68	8130	2.28	6080	2.07
4730	2.76	8370	2.44	6980	2.02
5390	2.8.0	8910	2.44	7850	1.94
5750	2.66	9990	2.62	8030	2.00
5870	2.68	10110	2.70	8780	2.20
6490	2.68	10710	2.82	9050	2.02
6780	2.68	10830	2.88	9230	2.10
7335	3.00	11010	3.10	9410	2.18
7470	3.06			9770	2.22
				9950	2.32
				10130	2.34
				11050	2.34
				11590	2.40
				11860	2.62
				11980	2.60
				12100	2.66
				12460	2.64
				12640	2.76
				12760	2.78
				13810	2.86
				13990	3.16

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลการศึกษาเบรคทรูการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับ GAC

ความสูงชั้น GAC (cm.)					
8 cm.		12 cm.		15 cm.	
เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)
20	0.969	510	0.30	750	0.26
60	1.233	20	0.271	100	0.440

ความสูงชั้น GAC (cm.)					
8 cm.		12 cm.		15 cm.	
เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)
80	1.300	40	0.363	160	0.475
100	1.412	60	0.394	270	0.480
180	1.472	80	0.547	300	0.541
240	1.657	120	0.574	660	0.555
270	2.038	240	0.721	690	0.661
300	2.196	300	0.752	720	0.677
600	2.274	390	0.913	750	0.784
720	2.070	510	1.008	780	0.895
780	2.083	600	1.026	840	0.909
900	2.258	810	1.207	1140	1.091
1140	2.723	900	1.387	1200	1.191
1200	2.835	1260	1.363	1380	1.272
1260	2.912	1440	1.406	1560	1.085
1320	2.923	1500	1.535	1660	1.375
1560	3.085	1560	1.579	1720	1.473
1740	3.272	1780	1.508	1800	1.419
1800	3.337	1840	1.564	1860	1.525
1980	3.452	1960	1.677	1920	1.559
2040	3.567	2740	1.759	2040	1.581
2100	3.666	3280	1.923	2160	1.728
		4180	1.742	2280	1.935
		4840	1.991	3780	1.996
		5020	2.238	4380	2.070
		5200	2.232	4560	2.544
		5500	2.488	4740	2.661
		5860	2.688	5040	2.720
		5980	2.809	6000	3.056
		6160	3.284	6180	3.107
		6280	3.395	6360	3.199
		6400	3.582	6540	3.371
				6720	3.507

ความสูงชั้น GAC (cm.)					
8 cm.		12 cm.		15 cm.	
เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)
				7080	3.541

ตารางที่ ค-3 ข้อมูลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไอออนจากกระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ BC

ชนิดไอออน					
ฟลูออไรด์		ฟอสเฟต		แคลเซียม	
เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)	เวลา (min)	C_t (mg/l)
0	3.820	0	0.431	0	17.0
3	0.000	3	8.062	60	2.3
6	0.000	6	9.498	120	3.0
12	0.000	12	8.240	360	4.0
15	0.000	15	8.409	690	5.0
21	0.000	21	7.150	870	5.3
35	0.000	35	7.901	2000	6.0
60	0.000	60	6.670	2600	6.7
70	0.000	70	6.549	3000	8.0
80	0.000	80	6.344	3500	8.3
150	0.070	150	5.560	4040	8.3
180	0.190	180	4.656	5120	8.7
210	0.410	210	4.397	5600	9.0
270	0.420	270	3.715	6080	9.4
300	0.370	300	3.437	6380	10.0
330	0.410	330	3.431	7450	10.0
480	0.730	480	2.972	9050	13.3
660	0.560	660	2.654	10510	14.5
750	0.510	750	1.927		
840	0.810	840	1.927		
1080	1.000	1080	1.853		

ชนิดไอออน					
ฟลูออไรด์		ฟอสเฟต		แคลเซียม	
เวลา (min)	C _t (mg/l)	เวลา (min)	C _t (mg/l)	เวลา (min)	C _t (mg/l)
1230	0.820	1230	1.817		
1410	1.350	1410	1.327		
1650	1.410	1650	1.045		
1860	1.450	1860	0.986		
2220	1.670	2220	0.642		

ตารางที่ ค-4 ข้อมูลการศึกษาการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ละลายของวัสดุดูดซับ BC

เวลา (min)	DOC (mg/l)
0	1.070
30	4.330
60	2.530
90	2.100
180	1.300
390	0.610
480	0.390
570	0.000
690	0.000
990	0.000
1100	0.000
1220	0.000
1340	0.000
1580	0.000
1700	0.000

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กฤษกร ศรีรังสิต
วัน เดือน ปี เกิด	6 กุมภาพันธ์ 2536
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
ที่อยู่ปัจจุบัน	841 หมู่ที่ 4 ตำบลบ้านจั่น อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY