

การกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรง

WATER DEFLUORIDATION BY BAUXITE IN FIXED-BED

ADSORPTION COLUMN

นายภัทรวุฒิ พงศ์วุฒิศักดิ์ รหัส 51362718

นางสาวศุภานิช ชารี รหัส 51362794

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่รับ.....23/พ.ค./2555.....

เลขทะเบียน.....16052259.....

เลขเรียกหนังสือ.....๗5.....

มหาวิทยาลัยนเรศวร ๗5 ๙

2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ      การกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์ดูดซับ  
แบบชั้นตรึง

ผู้ดำเนินโครงการ      นายภัทรวุฒิ    พงศ์วุฒิศักดิ์      รหัส 51362718  
                                  นางสาวศุภานิช    ชารี                              รหัส 51362794

ที่ปรึกษาโครงการ      อาจารย์ชัยวัฒน์    โภธิทอง


สาขาวิชา                วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

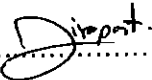
ภาควิชา                    วิศวกรรมโยธา


ปีการศึกษา              2554

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์ชัยวัฒน์ โภธิทอง)

  
.....กรรมการ  
(ดร.จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์อำพล เตโชวานิชย์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรง		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายภัทรวุฒิ พงศ์วุฒิสักดิ์	รหัส 51362718	
	นางสาวศุภานิช ชารี	รหัส 51362794	
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2554		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรง และออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์สำหรับครัวเรือนขนาดเล็กด้วยวิธี Kinetic Approach คอลัมน์พีวีซีซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.9 ซม. บรรจุบ็อกไซต์ขนาด 1-2 มม. ความสูง 30 ซม. เพื่อกำจัดฟลูออไรด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มก./ล. ถูกใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ จากการศึกษาคอลัมน์การดูดซับ พบว่า การฟื้นฟูสภาพบ็อกไซต์ด้วย 0.1 N NaOH และ 0.4 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์สูงขึ้น จากวิธีของ Kinetic Approach แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่จากการทดลอง  $k_1$  และ  $q_0$  มีค่าเท่ากับ 13.244 ลิตร/กก.วินาที และ  $1.29 \times 10^{-4}$  ตามลำดับ และพบว่า การกำจัดฟลูออไรด์สำหรับครัวเรือนขนาดเล็กที่อัตราการไหล 30 ลิตร/วัน ต้องใช้ปริมาณบ็อกไซต์ 8.2 กก. และ 35.0 กก. เพื่อใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ

**Project title** Water Defluoridation by Bauxite in Fixed-Bed Adsorption Column  
**Name** Mr. Pattharawut Pongwuttisak ID. 51362718  
Mrs. Supanich Charee ID. 51362794  
**Project advisor** Mr. Chaiwat Photong  
**Major** Environmental Engineering  
**Department** Civil Engineering  
**Academic year** 2011

.....

### Abstract

This research aims to study the water defluoridation by bauxite in the fixed-bed adsorption column and design the water defluoridation for a small household by kinetic approach. The 2.9 cm diameter of PVC adsorption column which contains 1-2 mm bauxite of 30 cm depth and the influent fluoride concentration of 5 mg/l was used in this study. The adsorption study found that regeneration with 0.1N NaOH and 0.4N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> resulted in improved fluoride removal efficiency of bauxite. The kinetic approach showed that the experimental constant of  $k_1$  and  $q_0$  were 13.244 l/kg.s and  $1.29 \times 10^{-4}$ , respectively. The amounts of bauxite in water defluoridation system for small households at flow rate of 30 l/d are 8.2 and 35.0 kg for a continuous using period of 1 week and 1 month, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

ที่โครงการนี้สำเร็จได้ ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ชัชววัฒน์ โพธิ์ทอง ที่ปรึกษาโครงการสำหรับการให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการต่างๆ และข้อมูล จนกระทั่งคณะผู้จัดทำ สามารถทำโครงการนี้จนสำเร็จสิ้น โดยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกท่าน ที่มีความอนุเคราะห์ให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยครั้งนี้ อาทิเช่น เครื่องแก้วสำหรับทำการทดลอง สารเคมี เป็นต้น

ขอขอบพระคุณคณะท่านอาจารย์มหาวิทยาลัยนเรศวร และอาจารย์พิเศษทุกท่านที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ทางคณะผู้ดำเนินงาน

ขอขอบคุณทุนวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอขอบพระคุณบริษัททำไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและผู้ปกครอง ที่ให้การอุปการะ ทั้งด้านการเงินและ ทางด้านจิตใจ จนกระทั่งทำให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายภัทรวุฒิ พงศ์วุฒิสักดิ์

นางสาวศุภานิช ชารี

มีนาคม 2555

## สารบัญ

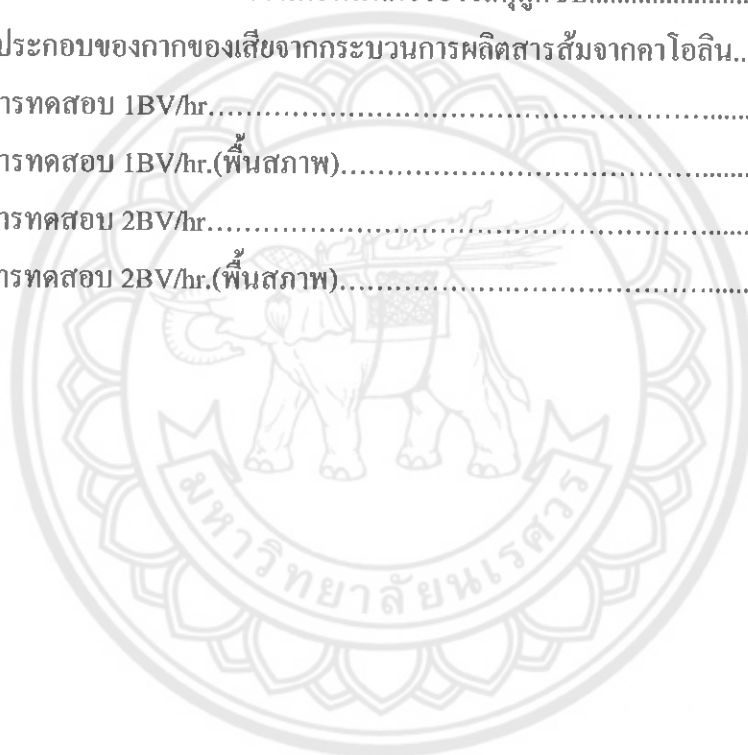
	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	2
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ฟลูออไรด์.....	4
2.2 สถานการณ์ฟลูออไรด์ในไทย.....	8
2.3 การกำจัดฟลูออไรด์.....	12
2.4 กระบวนการดูดซับ.....	16
2.5 บ็อกไซต์ (Bauxite).....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	28
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ(ต่อ).....	32
3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์.....	32
3.3 การทดสอบการดูดซับในคอลัมน์.....	33
3.3 การทดสอบการฟื้นฟูสภาพ.....	33
3.3 การสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	35
4.1 ผลการทดสอบกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์.....	35
4.2 ผลการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์.....	36
4.3 ผลการทดสอบการฟื้นฟูสภาพ.....	38
4.4 ผลการออกแบบระบบดูดซับฟลูออไรด์ขนาดเล็ก.....	40
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 บทสรุป.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	50

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	2
1.2 งบประมาณตลอดโครงการ.....	3
2.1 ปริมาณฟลูออไรด์ในอาหารและเครื่องดื่ม.....	5
2.2 ค่ามาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค.....	8
2.3 ระดับฟลูออไรด์สูงสุดในน้ำบาดาล.....	10
2.4 ผลของการบำบัดด้วยความร้อนต่อพื้นที่ผิวของวัสดุเคลือบ.....	24
2.5 องค์ประกอบของกากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากคาโอลิน.....	26
ข.1 ผลการทดสอบ 1BV/hr.....	51
ข.2 ผลการทดสอบ 1BV/hr.(พื้นสภาพ).....	53
ข.3 ผลการทดสอบ 2BV/hr.....	54
ข.4 ผลการทดสอบ 2BV/hr.(พื้นสภาพ).....	55





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพ.....	6
2.2 แผนที่แสดงแหล่งน้ำบาดาลที่ไม่ปลอดภัยของประเทศ.....	11
2.3 แผนภาพการไหลของออสโมซิส.....	13
2.4 Electrodialysis Stack.....	14
2.5 เครื่องกรองถ่านกระดูกในครัวเรือน.....	15
2.6 ลักษณะการดูดซับสารอินทรีย์ของ Activated carbon.....	17
2.7 Fixed-Bed Column.....	20
2.8 Breakthrough Curve.....	20
2.9 บ็อกไซต์ และรูปถ่ายแบบ SEM.....	25
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	28
3.2 การเตรียมบ็อกไซต์.....	30
3.3 องค์ประกอบคอลัมน์ดูดซับ.....	31
3.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน.....	33
ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตคอลัมน์ดูดซับ.....	47
ก.2 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
ก.3 หลอดสำหรับใส่เครื่องหมุนเหวี่ยงสาร.....	48
ก.4 การทดลองด้วยคอลัมน์.....	49
ข.1 กราฟผลการทดสอบการดูดซับที่อัตราการไหล 1BV/hr.....	52
ข.2 กราฟผลการทดสอบการดูดซับที่อัตราการไหล 1BV/hr.(พื้นสภาพ).....	53
ข.3 กราฟผลการทดสอบการดูดซับที่อัตราการไหล 2BV/hr.....	54
ข.4 กราฟผลการทดสอบการดูดซับที่อัตราการไหล 2BV/hr.(พื้นสภาพ).....	56

## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

mg./l.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
Kg.	=	กิโลกรัม
Mole/l	=	โมล/ลิตร
SPANDS	=	Sodium 2-(parasulfophenylazo)-1, 8-Dihydroxy-3, 6-Naphthalene-disulfonate
BV	=	ปริมาตรของตัวกลาง (Bed volume)
ml.	=	มิลลิลิตร



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การปนเปื้อนฟลูออไรด์ในน้ำเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของพื้นที่ทางตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งจากข้อมูลแผนที่ฟลูออไรด์ของกลุ่มพัฒนาความร่วมมือทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ (Intercountry Center for Oral Health, ICOH) เมื่อปี 2552 รายงานว่า มีหลายพื้นที่ที่น้ำมีฟลูออไรด์ในระดับที่ไม่ปลอดภัยต่อการบริโภคเกินกว่าร้อยละ 25 โดยเฉพาะพื้นที่ทางทิศเหนือและทิศตะวันตกของประเทศไทย ได้แก่ แม่ฮ่องสอน, ลำพูน, ตาก, พิจิตร, อุทัยธานี, กาญจนบุรี, ราชบุรี, เพชรบุรี และประจวบคีรีขันธ์ เป็นต้น นอกจากนี้จากข้อมูลของศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ปี 2539 ยังพบความเข้มข้นสูงสุดของฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลของ กิ่ง อ.แม่वंศ์ จ.นครสวรรค์, อ.ห้างฉัตร จ.ลำปาง และ อ.สอง จ.แพร่ มีค่าสูงถึง 11.95, 9.91 และ 4.48 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานน้ำดื่มซึ่งกำหนดไว้เพียง 1 มก./ล.

การได้รับฟลูออไรด์ในระดับที่พอดีจะส่งผลทำให้กระดูกและฟันแข็งแรง แต่หากร่างกายได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่สูงเกินไปก็จะก่อให้เกิดปัญหาฟันตกกระ (Dental Fluorosis) และการผิดรูปของกระดูก (Skeleton Fluorosis) (ศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ, 2539) หากในน้ำมีปริมาณฟลูออไรด์มากเกินไปก็สามารถกำจัดได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ ซึ่งอาศัยหลักการกรองผ่านเยื่อกรอง จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพงไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ในชนบทที่ห่างไกล ขณะที่กระบวนการดูดซับ (Adsorption) โดยอาศัยวัสดุดูดซับ เช่น อลูมินาแกมมันด์ ถ่านกระดูก หรือ ซีโอไลต์ รวมทั้งวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกอื่นๆ ก็สามารถกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำได้เช่นกัน นับเป็นทางเลือกที่ดีและประหยัดอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ

บอไซด์ (Bauxite) เป็นแร่ตามธรรมชาติที่มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  และ  $SiO_2$  ร้อยละ 55-65, 3-19 และ 6-15 ตามลำดับ (Liu et al., 2009) ซึ่งมีออกไซด์ของอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเช่นเดียวกับอลูมินาแกมมันด์ ซึ่งมีจำหน่ายในท้องตลาดและนิยมใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ในปัจจุบัน ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ จึงเป็นที่มาของการวิจัยครั้งนี้ คือ เพื่อศึกษาแนวทางในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการดูดซับบอไซด์ ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบชุดกำจัดฟลูออไรด์ขนาดเล็กต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรง
- เพื่อศึกษาการออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบความเป็นไปได้ในการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์
- เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์สำหรับบ้านเรือน

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

- ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์แบบชั้นตรง
- ศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัม/ลิตร
- ทดสอบการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างและกรด
- ออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์ด้วยวิธี Kinetic Method

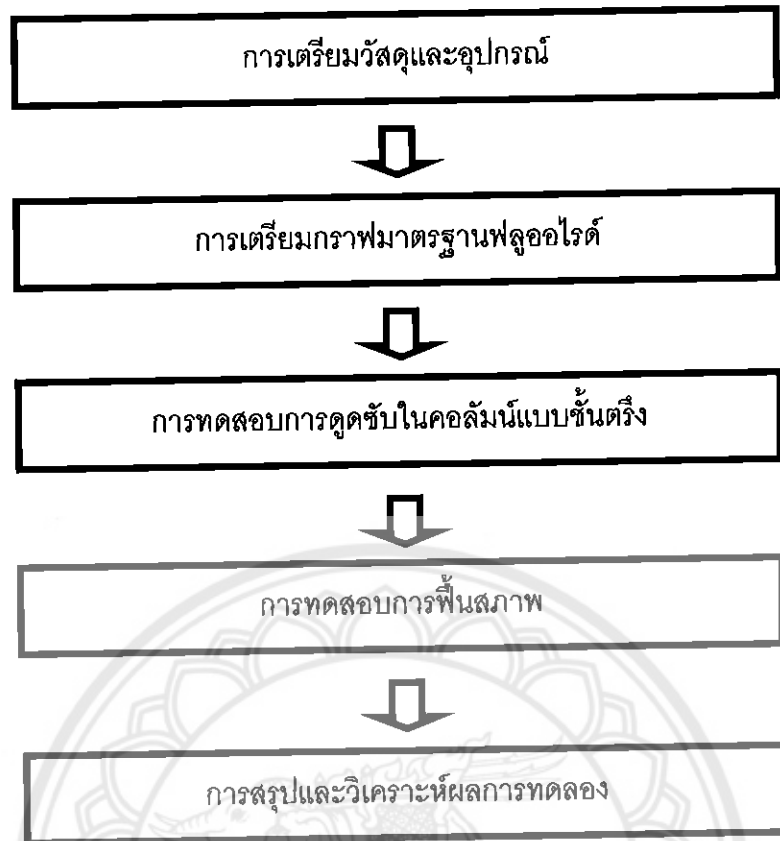
## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษากำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์ในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรง ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับของฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์ในคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง แล้วทดสอบการฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายต่างและกรด และเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์ขนาดเล็กสำหรับบ้านเรือน โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 1.1

## 1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	2554			2555		
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ศึกษาและเตรียมวัสดุดูดซับ						
ทดสอบคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรง						
ออกแบบระบบดูดซับ						
สรุปผลการศึกษา						
จัดทำรูปเล่ม						



รูปที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

### 1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.2 งบประมาณตลอดโครงการ

ลำดับ	รายการ	งบประมาณ (บาท)
1	ค่าวัสดุวิทยาศาสตร์	2,500
2	ค่าวัสดุสำนักงาน	500
3	ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่ม	500
รวมทั้งสิ้น		3,500

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ฟลูออไรด์

##### 2.1.1 ฟลูออไรด์ในสิ่งแวดล้อม

ฟลูออไรด์เป็นสารประกอบที่พบได้ในปริมาณร้อยละ 0.06-0.09 ของผิวโลก ฟลูออไรด์ที่มีอยู่ในดินและหิน มักจะอยู่ในรูปของฟลูออสปาร์ (Fluospars), ครายโอไลท์ (Cryloite), อพาไทท์ (Apatite), ไมก้า (Miga), ฮอว์นเบลล์ (Hornblende), และเพ็กมาไตท์ (Pegmatite) เช่น โทปาซ (Topaz), ทอร์มาลีน (Tourmaline) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในบรรยากาศซึ่งมีที่มาจากฝุ่นละอองในบรรยากาศจากการทำเหมืองและการเผาไหม้ หรือในรูปของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซฟลูออรีน ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ จากอุตสาหกรรมต่างๆ นอกจากนี้ยังพบได้ในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินซึ่งเกิดจากสัมผัสกับหินและแร่ในบริเวณนั้น

น้ำทุกแหล่งน้ำจึงมีฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ลักษณะทางภูมิศาสตร์ เคมีของแหล่งน้ำ องค์ประกอบของดินและหิน ความลึก ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินจึงมีค่าแตกต่างกัน ตั้งแต่น้อยกว่า 1 มก./ล. ไปจนถึงมากกว่า 25 มก./ล. ขณะที่น้ำในแม่น้ำลำคลองมักมีฟลูออไรด์ปริมาณต่ำ คือ ต่ำกว่า 0.5 มก./ล. ส่วนน้ำทะเลจะมีปริมาณฟลูออไรด์สูงกว่า คือ 0.8-1.4 มก./ล. ส่วนในน้ำฝนมีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์น้อยมาก แต่ในบางพื้นที่ที่มีการทำเหมืองแร่ หรือโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการชะล้างฟลูออไรด์จะฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศทำให้น้ำฝนมีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์มาก

ฟลูออไรด์ในผลิตภัณฑ์ป้องกันฟันผุ ประกอบด้วยฟลูออไรด์ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เช่น ฮาไมด์ โซเดียมฟลูออไรด์ หรือวิตามินเสริมเพื่อป้องกันฟันผุ จะมีฟลูออไรด์ประมาณ 250-24,000 มก./ล. ยาสีฟันมีปริมาณฟลูออไรด์ไอออน 1,000-1,500 มก./กก.

ในแต่ละวันมนุษย์มีโอกาสได้รับฟลูออไรด์จากน้ำดื่มมากที่สุดเมื่อเทียบกับอาหารทั้งหมดที่ได้รับ ปริมาณฟลูออไรด์ที่ได้รับจากน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำ, สภาพของอากาศ, อายุของผู้บริโภค และนิสัยการบริโภคอาหาร ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างปริมาณฟลูออไรด์ในธัญพืช ผัก ผลไม้ เมล็ดถั่ว เครื่องดื่ม เครื่องเทศ เนื้อสัตว์ และอื่นๆ ที่มนุษย์มีโอกาสได้รับเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งมีปริมาณฟลูออไรด์ตั้งแต่ระดับที่ต่ำกว่า 1 มก./กก. จนถึง 250 มก./กก.

ตารางที่ 2.1 ปริมาณฟลูออไรด์ในอาหารและเครื่องดื่ม (Meenakshi and Maheshwari, 2006)

Food item	F (mg/kg)	Food item	F (mg/kg)
<b>Cereals</b>		<b>Nuts and oil seeds</b>	
Wheat	4.6	Almond	4.0
Rice	5.9	Coconut	4.4
Maize		Mustard seeds	5.7
Pulses and legumes	5.6	Groundnut	5.1
Green gram dal	2.5	<b>Beverages</b>	
Red gram dal	3.7	Tea	60-112
Soyabean	4.0	Aerated drinks	0.77-1.44
<b>Vegetables</b>		<b>Spices and condiments</b>	
Cabbage	3.3	Coriander	2.3
Tomato	3.4	Garlic	5.0
Cucumber	4.1	Turmeric	3.3
Lady finger	4.0	<b>Food from animal sources</b>	
Spinach	2.0	Mutton	3.0-3.5
Lettuce	5.7	Beef	4.0-5.0
Mint	4.8	Pork	3.0-4.5
Potato	2.8	Fishes	1.0-6.5
Carrot	4.1	<b>Others</b>	
<b>Fruits</b>		Rock salts	200.0-250.0
Mango	3.7	Areca nut (supari)	3.8-12.0
Apple	5.7	Beetle leaf (pan)	7.8-12.0
Guava	5.1	Tobacco	3.2-38

### 2.1.2 ประโยชน์และโทษของฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อกระดูกและฟัน ฟลูออไรด์ในระดับที่เหมาะสมระหว่าง 0.5-1.0 มก./ล. จะสามารถป้องกันฟันผุได้ ฟลูออไรด์ที่เข้าไปในร่างกายจะสะสมที่กระดูกและฟัน โดยจะเข้าไปรวมตัวกับสารประกอบของฟันและกระดูก ทำให้แข็งแรงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะทำให้ฟันมีความทนทานต่อการละลายตัวเนื่องจากกรดที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อจุลินทรีย์และน้ำตาลทำให้เกิดฟันผุน้อยลงถ้าค้ำน้ำที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์เหมาะสมประมาณ 1 มก./ล. เป็นประจำในระยะที่ฟันกำลังเจริญเติบโต ฟลูออไรด์จะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของฟัน โดยเปลี่ยนผลึกองค์ประกอบหลักของเคลือบฟัน Hydroxyapatite ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) ไปเป็น Fluorapatite ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ) ซึ่งเสถียรกว่าและถูกกัดกร่อนด้วยกรดแลคติกได้น้อยกว่า ทำให้ฟันผุได้ยากขึ้น ฟลูออไรด์จะเข้าร่วมกับสารประกอบของฟันได้ 2 ระยะ คือ (มารยาท, 2546)

เมื่อร่างกายได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป ทั้งจากทางน้ำ อาหาร อากาศ ยาสีฟัน ฯลฯ จนเกินขอบเขตที่ร่างกายสามารถรับได้อย่างปลอดภัย ทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายได้หลายทาง ได้แก่ การเกิดผลต่อฟัน ทำให้เกิดฟันคุด กระดูกเกิดผลต่อกระดูก ทำให้กระดูกหนา เปราะ หักง่าย

ตลอดจนการเกิดขาโก่ง กระดูกผิดรูปร่างจากฟลูออไรด์เกาะบนกระดูก ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อระบบร่างกายอื่นที่ไม่ใช่ระบบโครงสร้าง เช่น ระบบต่อมไร้ท่อ ระบบสืบพันธุ์ กล้ามเนื้อ และเม็ดโลหิต นอกจากนี้ยังพบว่าในพื้นที่ที่ประชากรได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป เด็กๆ จะมีระดับของไอคิวโดยเฉลี่ยต่ำกว่าชุมชนที่มีฟลูออไรด์ต่ำ



(ก) Dental Fluorosis



(ข) Skeleton Fluorosis

รูปที่ 2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพ

การเป็นพิษ เนื่องจากฟลูออไรด์เป็นได้ใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การเป็นพิษชนิดเฉียบพลัน และการเป็นพิษชนิดเรื้อรัง 1) การเป็นพิษชนิดเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับฟลูออไรด์ปริมาณสูงในครั้งเดียว อาการเป็นพิษจะรุนแรงเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณของฟลูออไรด์ที่รับประทาน และน้ำหนักตัวของผู้ป่วย ซึ่งจะแสดงอาการตามลำดับ ความรุนแรงตั้งแต่ คลื่นไส้ อาเจียน น้ำลายไหลมาก และมีอาการปวดท้องมาก อาจมีอันตรายถึงชีวิตได้ ขณะที่ค่า Certainly lethal dose (CLD) หมายถึง ขนาดของฟลูออไรด์ ที่ทำให้เกิดพิษอย่างเฉียบพลัน จนถึงเสียชีวิตได้ ค่า CLD นี้ โดยทั่วไปจะเท่ากับ 50 มก. ฟลูออไรด์/น้ำหนักตัว 1 กก. สำหรับเด็กมีรายงานฯ ขนาดของฟลูออไรด์ที่ทำให้เสียชีวิตได้ มีขนาดตั้งแต่ 5-30 มก./น้ำหนักตัว 1 กก. ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดค่า Probably toxic dose ขึ้น (PTD) เท่ากับ 5 มก./กก. ซึ่งหมายถึง ขนาดของฟลูออไรด์น้อยที่สุด ที่ทำให้เกิดอาการแสดงของพิษจากฟลูออไรด์ ซึ่งต้องได้รับการรักษาอย่างเร่งด่วน หรืออาจทำให้ถึงแก่ชีวิต 2) การเป็นพิษชนิดเรื้อรัง การได้รับฟลูออไรด์ในขนาดที่สูงกว่า ระดับที่เหมาะสม (Optimal fluoride level) ในระดับ 2-10 มก./วัน ต่อเนื่องกันเป็นเวลาหลายปี จะเกิดผลข้างเคียงต่อฟัน คือ ฟันตกกระ (Dental fluorosis) และจะมีผลต่อกระดูกด้วย ระดับฟลูออไรด์ที่เหมาะสม คือ ปริมาณฟลูออไรด์ที่ควรได้รับในแต่ละวัน ซึ่งให้ผลสูงสุดในการป้องกันโรคฟันผุ โดยไม่ทำให้เกิดฟันตกกระ ในระดับที่มีผลต่อความสวยงาม ค่านี้ไม่ควรเกิน 0.05-0.07 มก./นน.ตัว กก./วัน (กลุ่มงานทันตสาธารณสุขชุมชน, 2541)



- ผลกระทบต่อฟัน เมื่อร่างกายได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปติดต่อกัน ในระยะที่ร่างกายกำลังสร้างฟันอยู่ คือช่วงเวลาดังแต่แรกเกิดจนถึงอายุประมาณ 12 ปี จะมีความผิดปกติเกิดขึ้น ความผิดปกติที่เห็นได้เป็นครั้งแรก ได้แก่การเกิดความผิดปกติกับผิวเคลือบฟันของฟันแท้ที่เรียกว่าฟันตกกระ (Dental fluorosis) ฟันตกกระส่วนใหญ่เกิดในฟันแท้ เนื่องจากฟันน้ำนมสร้างขณะอยู่ในครรภ์มารดา และฟลูออไรด์ไม่สามารถซึมผ่านรกไปยังทารกในครรภ์ได้ ฟันตกกระ ไม่ใช่โรค แต่เป็นสภาวะการเจริญบกพร่องของเคลือบฟัน ซึ่งเกิดจากการได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปปริมาณที่เหมาะสม แล้วไปรบกวนกระบวนการสร้างแร่ธาตุที่เคลือบฟันในระยะที่มีการสร้างฟันและฟันเจริญเติบโตอยู่ในกระดูกขากรรไกร ทำให้เคลือบฟันมีสีขาวขุ่นบางส่วนหรือทั้งซี่ ตามระดับความรุนแรงของสภาวะฟันตกกระ ความรุนแรงจะขึ้นกับปริมาณของฟลูออไรด์ที่ได้รับ ซึ่งมีได้ตั้งแต่แทบจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ หรือพบผิดปกติเล็กน้อย เป็นจุดขาวประปราย มีเส้นขาวบาง ๆ หรือเป็นหย่อมขาว ๆ ใกล้เคียง ปลายหน้าตัดของฟันหน้า หรือยอดแหลมของฟันหลังเหมือนหิมะปกคลุมยอดเขาที่ค่อย ๆ บางลง กลืนไปกับเคลือบฟันรอบ ๆ หรือผิดปกติรุนแรง ที่มีหลุมตามขวางเคลือบฟันเป็นสีน้ำตาล มักเห็นชัดเจนในฟันหน้าและฟันกรามน้อย บางครั้งเคลือบฟันที่ตกกระ แยกออกจนเห็นสีเหลืองของเนื้อฟัน สภาวะฟันตกกระมักเกิดกับฟันซี่เดียวกันทั้งสองฟากของขากรรไกร เพราะมีการสร้างและเจริญเติบโตในระยะเดียวกัน พบมากในฟันกรามน้อย และฟันกรามซี่ที่ 2 รองลงมาคือฟันตัดหน้าบน ส่วนฟันตัดหน้าล่าง มีโอกาสเกิดน้อยที่สุด สภาวะฟันตกกระนี้เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างถาวร เมื่อเกิดขึ้นแล้วไม่มีทางกลับคืนสู่สภาพปกติได้

- ผลกระทบต่อกระดูก ในผู้ที่ดื่มน้ำที่มีฟลูออไรด์สูงมากติดต่อกันเป็นเวลาตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไปไม่ว่าในช่วงใดของอายุ จะเกิดความผิดปกติของกระดูกเกิดขึ้น พิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกนี้อาจเกิดมากน้อยได้ตั้งแต่ไม่มีอาการภายนอกใดๆ นอกจากอาการปวดตามข้อเล็กๆ เช่น มือ เท้า เข้าไปจนถึงปวดหลัง แต่จะพบความผิดปกติได้จากภาพถ่ายทางรังสี ที่กระดูกมีความทึบแสงและหนา กว่าปกติ ไปจนถึงผู้ที่เห็นมากจนพบว่ามีอาการจับตัวของ แคลเซียมตามเส้นเอ็น และข้อต่อเกิดกระดูกงอก และกระดูกเชื่อมติดกันข้อข้อต่อต่างๆจนทำให้เป็นปัญหาในการเคลื่อนไหว ที่เรียกกันว่า Crippling skeletal fluorosis ถ้าเอากระดูกของคนที่มีสภาวะฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูกมาดูจะเห็นว่ากระดูกเหล่านี้จะหนัก มีสีขุ่น ไม่เรียบมีกระดูกงอกขรุขระซึ่งความขรุขระของกระดูกเหล่านี้ช่วยในการวินิจฉัยแยกสภาวะฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูก ออกจากสาเหตุอื่นๆที่ทำให้เกิดกระดูกหนา ทึบได้ เนื่องจากการเกิดพิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกในระยะแรกๆ จะมีอาการเพียงการปวดตามข้อ ไปจนถึงปวดหลัง การวินิจฉัยทำได้ยาก การรักษาจึงมักเป็นการให้ยาแก้ปวด จากรายงานในประเทศไทย พบว่าในบริเวณที่มีฟลูออไรด์สูงจะมีอัตราการให้ยาแก้ปวดสูงกว่าในพื้นที่อื่นๆ ทำให้เกิดอันตรายจากผลข้างเคียงของการให้ยาแก้ปวดสูงตามไปด้วย (สันสนธิ และคณะ, 2552)

### 2.1.3 มาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม

ค่าความเข้มข้นมาตรฐานของฟลูออไรด์ในน้ำดื่มของการประปานครหลวงกำหนดไว้ 0.7-1.0 มก./ล. ขณะที่มาตรฐานน้ำบริโภคตาม มอก. 257/2549 สำหรับน้ำที่บรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท (น้ำบริโภคประเภทที่ 1) และไม่บรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท (น้ำบริโภคประเภทที่ 2) กำหนดไว้ที่ 0.7-1.0 มก./ล. ดังตารางที่ 2.2 ส่วนค่าความเข้มข้นที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลก คือ ไม่เกิน 1.5 มก./ล. ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค

มาตรฐาน/ค่าแนะนำ	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)	
	เกณฑ์กำหนดสูงสุด	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
มาตรฐานน้ำดื่มการประปานครหลวง	0.7	1.0
มาตรฐานน้ำบริโภคประเภทที่ 1 มอก. 257/2549	0.7	-
มาตรฐานน้ำบริโภคประเภทที่ 2 มอก. 257/2549	0.7	1.0
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้น้ำบริโภค	0.7	1.0
คำแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปี 2549	1.5	

### 2.2 สถานการณ์ฟลูออไรด์ในไทย

ประเทศไทยในประเทศไทยมีประชาชนในหลายพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดภาวะฟันตกกระ เนื่องจากการได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากเกินไป ปัญหาฟลูออไรด์ในน้ำบริโภคสูง มีผลกระทบต่อฟันและสุขภาพ โดยทั่วไปของประชาชน พบมากในพื้นที่เขตภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย เป็นปัญหาที่เรื้อรังมาเป็นเวลานาน จากการได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไป และติดต่อกันเป็นเวลานาน โดยเฉพาะการบริโภคน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูงเกินมาตรฐาน (มาตรฐานปริมาณฟลูออไรด์ในระดับที่ปลอดภัยของประเทศไทยหรือประเทศในเขตร้อน คือ ไม่เกิน 0.70 มก./ล.) ส่งผลให้เกิดฟันตกกระในพื้นที่ที่มีลักษณะชาวชนบางส่วนหรือทั้งซึ่งไปจนถึงเป็นสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆ มีหลุมตื้นๆ เรียงกันเป็นแถวบนเคลือบฟันแล้วแต่ระดับความรุนแรง และหากได้รับต่อไปจนเข้าสู่วัยผู้ใหญ่หรือวัยสูงอายุ ก็จะทำให้เกิดความผิดปกติที่กระดูกแขน ขา สะโพกและกระดูกสันหลัง จะโค้งงอ หนาตัว เปาะและหักง่าย มีอาการปวดข้อ เคลื่อนไหวลำบาก หรืออาจทำให้เกิดความพิการ (สุพจน์, 2550)

ภาคเหนือตอนบนและภาคตะวันตกของประเทศไทย เช่น จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน ลำพูน ลำปาง พะเยา กาญจนบุรี และราชบุรี เป็นต้น มีสายแร่ฟลูออไรด์พาดผ่าน มาตามแนวได้ผิวดิน ทำให้มีการปนเปื้อนของสารฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบริโภคทั้งแหล่งน้ำ ใต้ดินและน้ำผิวดินหลายบริเวณ โดยเฉพาะในน้ำบาดาล ประชาชนจึงได้รับสารฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายใน

ระดับสูงกว่ามาตรฐานถึงขั้นที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ แม้ในน้ำดื่มบรรจุขวดก็พบว่ามี ฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง (จุมพล, 2540)

รายงานผลการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ของผ่านทันตสาธารณสุข สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2527 จากการเก็บตัวอย่างน้ำจาก 1,084 บ่อ ทั่วจังหวัดเชียงใหม่ ใน 7 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง, ดอกสะเก็ด, ผาง, จอมทอง, หางคง, คอยเต่า, และสารภี พบว่ามีปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบ่อซึ่งประชาชนใช้ในการบริโภคสูงเกินกว่า 1.2 มก./ล. จำนวนกว่าร้อยละ 6.8 และบ่อที่พบความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่า 3.0 มก./ล. มีจำนวนกว่าร้อยละ 1.0

สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ รดหน่วยบริการข้อมูลฟลูออไรด์สำหรับชุมชน ซึ่งทำการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และแม่ฮ่องสอน พบว่า จังหวัดเชียงใหม่ มีปริมาณฟลูออไรด์ ระหว่าง 0.10-9.57 มก./ล. ร้อยละ 14.9 ซึ่งปริมาณฟลูออไรด์สูงสุด คือ น้ำบ่อบ้านใหม่หมอกจ๋าม ตำบลท่าตอน อำเภอแม่เฒ่า ขณะที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน มีปริมาณฟลูออไรด์ระหว่าง 0.10-27.1 มก./ล. และพบว่าปริมาณฟลูออไรด์สูงเกินมาตรฐาน คือ ร้อยละ 32.0 ซึ่งฟลูออไรด์สูงสุด คือ น้ำพุร้อน เมืองแปง บ้านใหม่คอนตัน ตำบลเมืองแปง อำเภอปาย (สุพจน์, 2550)

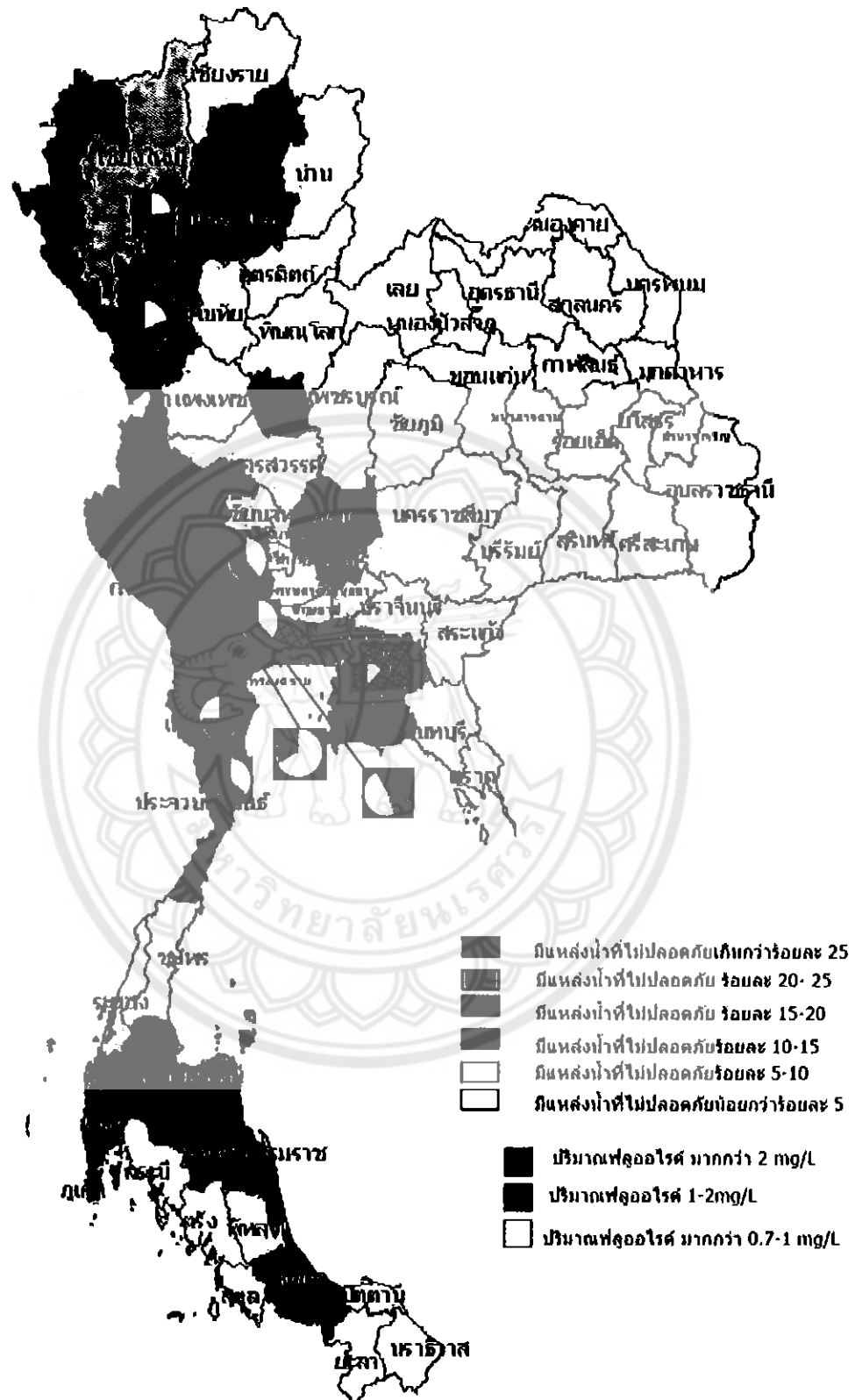
จากการเก็บตัวอย่างน้ำจากครัวเรือนทั้งหมด 860 ครัวเรือน ทั้งน้ำที่ใช้ทำอาหารและ น้ำที่ใช้ดื่ม ได้รับตัวอย่างน้ำที่มีผลตกคราบถวนสมบูรณ์ทั้งสิ้น 728 ตัวอย่าง พบว่าน้ำ บริโภคที่ใช้สำหรับดื่มส่วนใหญ่ จำนวน 370 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 50.82 มี ฟลูออไรด์เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนที่เหลือจำนวน 358 ตัวอย่าง หรือคิดเป็นร้อยละ 49.18 มีฟลูออไรด์ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่น้ำบริโภคที่ใช้สำหรับทำอาหาร ส่วนใหญ่จำนวน 649 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 89.15 มีฟลูออไรด์เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนที่เหลืออีกเพียง 79 ตัวอย่าง หรือคิดเป็นร้อยละ 10.85 เท่านั้นที่มีฟลูออไรด์ ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร (ฉัตรภักดิ์, 2551)

คันสนธิ และคณะ (2552) ทำการรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจำนวน 61343 บ่อ จากข้อมูลของหน่วยงานรัฐที่มีบทบาทหน้าที่ในการตรวจวิเคราะห์น้ำ ได้แก่ กองทันตสาธารณสุข ศูนย์ห้องปฏิบัติการ และศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย และ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.2 นำมาคำนวณหาค่าร้อยละจากจำนวนบ่อทั้งหมดในแต่ละจังหวัด จัดทำเป็นแผนที่สาระสนเทศทางภูมิศาสตร์ จำแนกข้อมูลแต่ละจังหวัด โดยใช้ค่าปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำที่สูงกว่า 0.7 มก./ลิตร (ค่ามาตรฐานของกรมอนามัย) เป็นค่าปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำที่ไม่ปลอดภัย ส่วนค่าปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำที่เกิดกว่า 2 มก./ลิตร เป็นค่าที่จะทำให้เกิดเป็นพิษต่อกระดูก ถ้าดื่มติดต่อกันเป็นเวลานาน ส่วนค่าของปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำระหว่าง 0.3-0.7 เป็นค่าที่บ่งบอกว่าไม่มีความจำเป็นต้องมีการใช้ฟลูออไรด์เสริม เมื่อจำแนกข้อมูลแล้วคำนวณค่าร้อยละ เพื่อสะท้อนภาพความเสี่ยงของพื้นที่

นอกจากนั้น กองทัณฑสาธารณสุข กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2539) ได้รายงานค่าสูงสุดของฟลูออไรด์ที่พบในน้ำบาดาลของจังหวัดต่างๆ ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่าในเขตภาคเหนือบริเวณจังหวัด ลำปาง แพร่ และลำพูน มีฟลูออไรด์สูงสุดประมาณ 10 มก./ล. ส่วนนครสวรรค์ บริเวณกิ่งอำเภอแม่วงค์ มีค่าฟลูออไรด์สูงสุด 12 มก./ล. ขณะที่ราชบุรีซึ่งอยู่ทางทิศตะวันตกของประเทศ พบค่าฟลูออไรด์สูงสุดถึง 12.3 มก./ล. ขณะที่มาตรฐานค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ไม่ควรเกิน 0.7 มก./ล.

ตารางที่ 2.3 ระดับฟลูออไรด์สูงสุดในน้ำบาดาล (กองทัณฑสาธารณสุข, 2539)

จังหวัด	อำเภอ/กิ่งอำเภอ	ระดับฟลูออไรด์สูงสุด (มก./ล.)
ราชบุรี	อ.สวนผึ้ง	12.30
นครสวรรค์	กิ่ง อ.แม่วงค์	11.95
ลำปาง	อ.ห้างฉัตร	9.91
สุพรรณบุรี	อ.เมือง	8.10
นครปฐม	อ.บางเลน	7.72
กาญจนบุรี	กิ่ง อ.หนองปลื้ม	5.21
แพร่	อ.สอง	4.84
ลำพูน	อ.ลี้	4.30



รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงแหล่งน้ำบาดาลที่ไม่ปลอดภัยของประเทศ (คันสนธิ และคณะ, 2552)

## 2.3 การกำจัดฟลูออไรด์

การเติมฟลูออไรด์ (Fluoridation) หมายถึง กระบวนการเติมฟลูออไรด์ให้แก่ น้ำ เพื่อให้มีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมตามมาตรฐานกำหนด ใช้สำหรับน้ำที่มีระดับฟลูออไรด์น้อยเกินไป แต่ในทางตรงข้าม หากน้ำมีฟลูออไรด์สูงเกินไป การกำจัดฟลูออไรด์ที่มีมากเกินไปออกจากน้ำดื่ม เรียกว่า การกำจัดฟลูออไรด์ (Defluoridation) เป็นวิธีการที่ถูกใช้กับน้ำดื่มที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงเกินมาตรฐานน้ำดื่ม เพื่อป้องกันปัญหาสุขภาพอนามัยต่างๆ ที่จะตามมาแก่ผู้ใช้น้ำ กระบวนการกำจัดฟลูออไรด์มักใช้อยู่ 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) และ กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) โดยมีรายละเอียดดังนี้

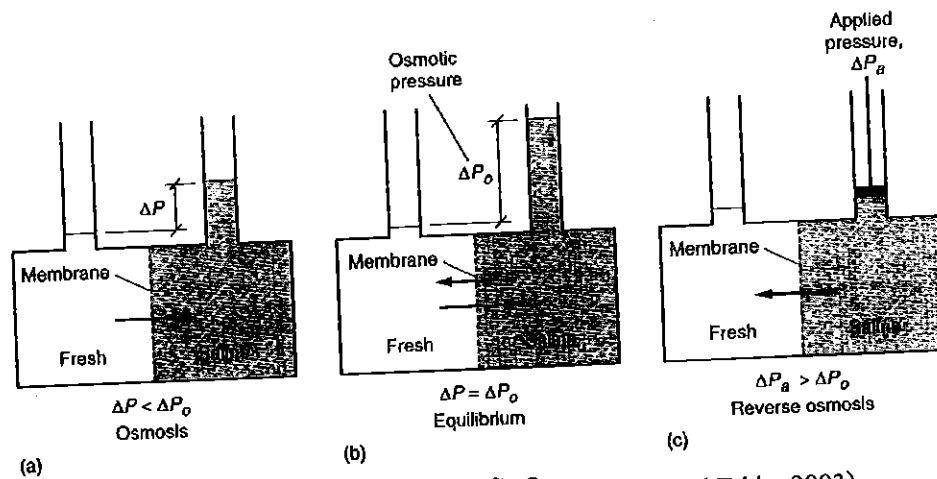
### 2.3.1 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

โดยทั่วไปกระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ (1) เมมเบรนที่ขับเคลื่อนด้วยความดัน (Pressure-Driven Membrane) ประกอบด้วย Microfiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) และ Reverse Osmosis (RO) และ (2) เมมเบรนที่ขับเคลื่อนด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electrical Voltage-Driven Membrane) ได้แก่ Electrodialysis (ED) และ Electrodialysis Reversal (EDR) ขณะที่การกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้ระบบเมมเบรน มักต้องใช้กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับหรือกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าแบบ Electrodialysis

ระบบเมมเบรนแบบ MF, UF, NF และ RO น้ำเข้าจะถูกจ่ายเข้าด้วยความดันให้ไหลเข้าสู่ Vessel ต่างๆ ที่บรรจุเมมเบรน ซึ่งเรียกว่า Module เมมเบรนจะยอมให้น้ำผ่านได้ ส่วนสารอื่นที่ผ่านออกไปไม่ได้จะถูกกำจัดออกไป ระบบเมมเบรนทั้งหลายจะแยกน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) Permeate Stream (สำหรับระบบ RO, NF และ UF) หรือ Filtrate (สำหรับ MF) ซึ่งเป็นน้ำสะอาดที่ผ่านเมมเบรน และ (2) Concentrate หรือ Retentate Stream คือ น้ำเข้มข้นที่ประกอบด้วยสารต่างๆ ที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเข้าด้วยเมมเบรน

#### ■ กระบวนการออสโมซิสแบบย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เมื่อสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน ถูกกั้นขวางด้วยเมมเบรนที่มีสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน ดังรูปที่ 2.3 ผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นดังกล่าวจะทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นของสารละลายต่ำกว่าไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่า จนกระทั่งผลต่างของความดันมีค่าเท่ากับศักย์ที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นจึงเกิดการสมดุล เรียกความดันที่ทำให้สมดุลนี้ว่า ความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติและความเข้มข้นของตัวถูกละลาย และอุณหภูมิ หากใส่ความดันในทิศทางตรงข้ามให้มากกว่าความดันออสโมติก จะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในทิศทางตรงข้าม คือ โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงกว่าไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าดังรูป 2.3 เรียกกระบวนการดังกล่าวว่าออสโมซิสแบบย้อนกลับ (Reverse Osmosis)



รูปที่ 2.3 แผนภาพการไหลของออสโมซิส (Metcalf and Eddy, 2003)

กระบวนการออสโมซิสแบบย้อนกลับ สามารถแยกตัวทำละลายออกจากสารละลาย โดยอาศัยแรงดันที่มีค่ามากกว่าแรงดันออสโมติก ระหว่าง 125-1,200 ปอนด์/ตร.นิ้ว (Osmotic Pressure) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การผลิตน้ำจืดจากน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม การกำจัดธาตุอาหารต่างๆ ในน้ำ การกำจัดสารกัมมันตภาพรังสี หรือกำจัดสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่เป็นอันตรายบางชนิดออกจากน้ำ เป็นต้น

ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับ ชนิดของเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย ลักษณะของอออนที่ต้องการแยกออก สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ เช่น พีเอชและอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงมาก อาจจำเป็นต้องมีระบบกำจัดสารแขวนลอยในน้ำออกก่อนป้อนเข้าระบบเพื่อป้องกันการอุดตันของเยื่อเลือกผ่าน นอกจากนี้อายุของเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำที่เข้าระบบ เช่น มีแบคทีเรีย ฟีนอล รา หรืออุณหภูมิ โดยปกติเยื่อเมมเบรนมักจะมีอายุการใช้งานไม่เกิน 2 ปี

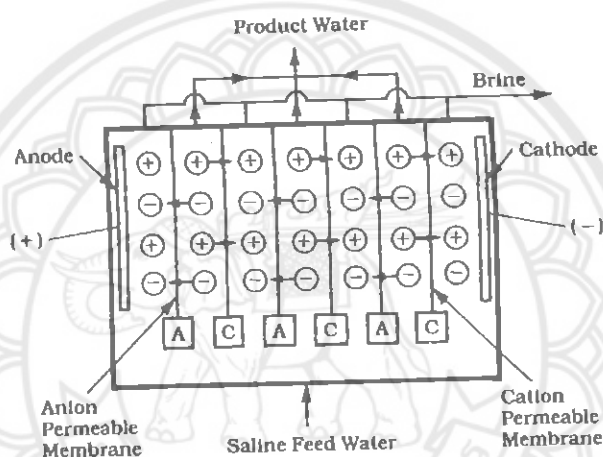
อย่างไรก็ตาม ระบบเมมเบรนจำเป็นต้องอาศัยพลังที่ต้องใส่เข้าไปในรูปของพลังงาน เพื่อเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของน้ำให้ไหลผ่านเมมเบรนไปได้ ยิ่งระบบที่มีขีดความสามารถในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้ก็จำเป็นต้องอาศัยเมมเบรนที่มีรูขนาดเล็ก และจำเป็นต้องอาศัยความดันที่สูงมาก โดยทั่วไปกระบวนการออสโมซิสแบบย้อนกลับ มักต้องการพลังงานจากเครื่องสูบลมแรงดันสูงน้ำเพื่ออัดความดันให้แก่ระบบ โดยปกติต้องการพลังงานประมาณ 2.4-4.8 กิโลวัตต์.ชม./ลบ.ชม.

#### ▪ กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)

Electrodialysis เป็นกระบวนการเมมเบรนที่อาศัยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและเยื่อเมมเบรนเพื่อแยกอออนออกจากของเหลว อออนบวกและอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรนซึ่งถูกวางระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้กับอิเล็กโทรดให้เกิดการไหลของกระแสตรง ส่งผลให้อออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ (Cathod) และอออนลบเคลื่อนที่เข้าหา

ขั้วบวก (Anode) การจัดเรียงเมมเบรนสลับกันให้เกิดเป็นช่องตรงกลาง เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการแยกเป็นช่องที่เป็นสารละลายที่เจือจางหรือปราศจากไอออน และช่องที่มีไอออนบวกและลบละลายอยู่เข้มข้น ดังรูปที่ 2.4

โดยทั่วไประบบประกอบด้วยเมมเบรนที่ยอมให้ไอออนบวกและลบผ่านได้ และช่องว่าง (Spacer) ซึ่งมักเรียกรวมกันว่า Cell Pairs วางในแนวตั้งระหว่างอิเล็กโทรด น้ำเข้าจะถูกป้อนด้วยความดันประมาณ 50 ปอนด์/ตร.นิ้ว ไอออนจะถูกกำจัดออกจากน้ำและผลิตน้ำที่ปราศจากไอออนออกมา อย่างไรก็ตามระบบ Electrodialysis ไม่สามารถกำจัดไอออนที่เป็นกลาง เช่น ซิลิกา และอนุภาคที่เป็นกลางอื่นๆ ได้ เนื่องจากน้ำที่ผลิตได้ไม่ใช่เป็นน้ำที่กรองผ่านเมมเบรน แต่เป็นน้ำที่แยกไอออนออก โดยให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไป ทำให้ไอออนที่เป็นกลางยังคงอยู่ในน้ำ ไม่เคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.4 Electrodialysis Stack (Reynolds and Richards, 1996)

การทำงานของระบบจะขึ้นอยู่กับ กระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายแก่ระบบ อัตราการไหลของน้ำเสีย จำนวนเซลล์ที่ใช้ และความเข้มข้นของสารละลาย หากอัตราส่วนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density, CD) ต่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากเกินไป ซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าในระบบมากหรือความเข้มข้นของสารละลายน้อยเกินไป ทำให้เกิดแนวโน้มการตกผลึกบริเวณผิวของอิเล็กโทรด ส่งผลให้ความต้านทานในระบบมากขึ้น ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง อย่างไรก็ตามระบบมักต้องอาศัยพลังงานสูง รวมทั้งเมมเบรนมีราคาแพงและต้องเปลี่ยนเป็นระยะๆ

### 2.3.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

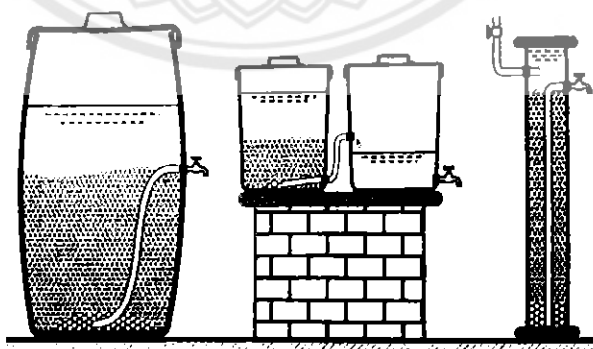
กระบวนการดูดซับกระบวนการดูดซับเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ต้องอาศัยวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ออกจากน้ำให้อยู่ในระดับความเข้มข้นที่ปลอดภัยได้ แม้ว่ากระบวนการเมมเบรนจะเป็นวิธีสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ดี แต่กระบวนการดูดซับก็ยังคงวิธีที่เข้าถึงได้ง่ายกว่า เนื่องจากเป็นวิธีมีราคาที่ถูกกว่า ในอดีตที่ผ่านมานักวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะแสวงหาวัสดุดูดซับชนิดใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่มากขึ้นและมีราคาที่ถูกลง วัสดุส่วน



ใหญ่ที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ ได้แก่ Activated Alumina, Impregnated Activated Alumina, Rare Earth, Activated Clay, Impregnated Silica, Carbonaceous Material, Solids Industrial Waste เช่น Red Mud, Spent Catalysts และ Fly Ash, Zeolite, Biosorbent, Alum, Alum Sludge และ Modified Chitosan เป็นต้น แต่ก็จะมีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถกำจัดฟลูออไรด์ให้อยู่ในระดับมาตรฐานน้ำดื่ม คือ 1.0-1.5 มก./ล. ได้ (Mohapatra et al., 2009)

วัสดุดูดซับที่มีราคาถูก เช่น Calcite, Clay, Tree bark, Saw dust, Rice husk, Ground nut husk และ Rare earth oxide เป็นต้น ก็มีความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามวัสดุดังกล่าวมักมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถกำจัดฟลูออไรด์ให้ต่ำกว่า 2 มก./ล. จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่ม โดยเฉพาะวัสดุบางชนิดที่สามารถทำงานได้ดีเฉพาะสภาวะที่ pH ต่ำมากๆ เช่น Activated carbon ซึ่งสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ pH ต่ำกว่า 3 (Tripathy et al., 2006) ขณะที่ Activated alumina เป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ได้ดี ความสามารถในการกำจัดขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะของผลึก (Crystalline form) และ pH ของสารละลาย รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ เช่น กระบวนการ Activation และความเป็นด่าง (Alkalinity) (Tripathy et al., 2006)

การกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้ถ่านกระดูกสัตว์ มีการนำมาบรรจุในเครื่องน้ำหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.5 เช่น เครื่องกรองของศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ (ICOH defluoridator) โดยนำกระดูกสัตว์ที่ใช้ต้องเผาให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมจึงจะสามารถคงคุณสมบัติได้นาน และน้ำที่ผ่านกระบวนการจึงจะไม่มีสีและกลิ่นเป็นที่รังเกียจ กระดูกเมื่อแล้วต้องนำมาบดและคัดขนาดให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้ และทำการเปลี่ยนถ่านกระดูกใหม่เมื่อใช้งานจนหมดสภาพ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2545)



รูปที่ 2.5 เครื่องกรองถ่านกระดูกในครัวเรือน

การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยดินเผา มักมีประสิทธิภาพต่ำ ไม่สามารถใช้กับน้ำที่มีฟลูออไรด์สูงเกิน 2 มก./ล. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่การใช้ Activated alumina ในการกำจัดฟลูออไรด์

ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำและความบริสุทธิ์ของสารเคมีที่ใช้ สามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้ 3-4 ครั้ง (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2545) อย่างไรก็ตาม ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ กระบวนการดูดซับก็ยังคงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายกว่าวิธีอื่น เมื่อเทียบกับ การตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า (Tripathy et al., 2006)

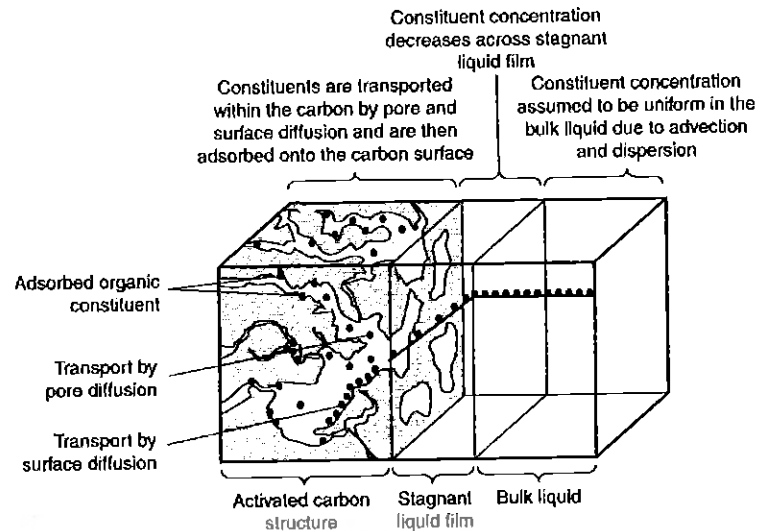
## 2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กลกระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการสะสมของสารในสารละลายบนพื้นผิวที่เหมาะสม หรือกระบวนการเคลื่อนย้ายสารในสถานะของเหลว (Liquid Phase) สู่อสถานะของแข็ง (Solid Phase) โดยที่ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) หมายถึง สารที่ถูกกำจัดจากสถานะของเหลว ส่วนตัวดูดซับ (Adsorbent) หมายถึง สภาวะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ที่เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับ (Metcalf and Eddy, 2003)

การดูดซับของโมเลกุลบนผิวของตัวดูดซับ อาจเกิดจากแรงดึงดูดทางกายภาพที่เรียกว่า แรงวานเดอวาล์ว (Van Der Waals Force) หรือแรงดึงดูดทางเคมีซึ่งเกิดจากพันธะเคมีโดยการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ตัวดูดซับที่ใช้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย คือ แอคติเวตเต็ดคาร์บอน (Activated Carbon) ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจาก ถ่านหินบางชนิด ถ่านกระดุกสั้ว ถ่านกะลามะพร้าว หรือเมล็ดของผลไม้บางชนิด โดยอาศัยพลังงานความร้อน มีทั้งแบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) และแบบผง (Power Activated Carbon, PAC) มักใช้เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ สี กลิ่น รส คลอรีน หรือสารไฮโดรคาร์บอน เป็นส่วนใหญ่ รวมทั้งโลหะหนัก ขณะที่ แกลเซียม, แมกนีเซียม, สารอินทรีย์, น้ำมันและไขมัน และของแข็งแขวนลอย มักส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

### 2.4.1 กลไกการดูดซับ

โดยปกติ ขั้นตอนการดูดซับของสารอินทรีย์บนวัสดุดูดซับ มักถูกอธิบายด้วยประมาณ 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.6 คือ (1) การเคลื่อนที่ในสารละลาย (Bulk Solution Transport) (2) การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion Transport) (3) การเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน (Pore Transport) และ (4) การดูดซับ (Sorption) กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวและรูพรุนภายใน โครงสร้างของวัสดุดูดซับ ทั้ง Macropores (> 25 nm), Mesopores (1-25 nm), Micropores (< 1 nm) และ Submicropores ขณะที่พื้นผิวของ Macropores และ Mesopores จะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่ารูพรุนที่เล็กกว่า Micropores มาก (Metcalf and Eddy, 2003)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการดูดซับสารอินทรีย์ของ Activated carbon (Metcalf and Eddy, 2003)

- การเคลื่อนที่ในสารละลาย (Bulk Solution Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ที่จะถูกดูดซับผ่านของเหลว เข้าสู่เขตฟิล์มตรึง (Fix Film) ของของเหลวที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ ซึ่งเกิดจากการพา (Advection) และการแพร่ (Dispersion) เป็นหลัก
- การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านชั้นฟิล์มของเหลวนิ่งที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ (Stagnant Liquid Film) เพื่อเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของวัสดุดูดซับ
- การเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน (Pore Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของสารที่จะถูกดูดซับผ่านรูพรุน จากการแพร่ของโมเลกุลผ่านของเหลวในรู และ/หรือการแพร่บนผิวของวัสดุดูดซับ
- การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนที่เกิดการดูดติดกันระหว่างสารที่จะถูกดูดซับกับพื้นผิวของวัสดุดูดซับ

#### 2.4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ขณะที่กระบวนการดูดซับผิวเริ่มขึ้น กระบวนการจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่างสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับและเฟสของแข็ง (Solid Phase) ในสารละลาย เมื่อถึงจุดสิ้นสุดของกระบวนการ จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถของสารดูดซับในการกำจัดเฟสของแข็งในสารละลาย

Adsorption Isotherm เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายสมดุลของกระบวนการ และเป็นปัจจัยที่สำคัญในการคัดเลือกวัสดุดูดซับ โดยอาศัยทดสอบเชิงปริมาณเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับ การทดสอบศึกษาความสามารถในการดูดซับสามารถทำได้โดยเตรียมวัสดุดูดซับน้ำหนักเท่าๆ กัน และสารละลายที่มีไอออนที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นเติมวัสดุดูดซับลงไป ในสารละลาย การดูดซับจะดำเนินต่อไปจนถึงจุดสมดุล โดยทั่วไปมักใช้เวลาประมาณ 1

ชั่วโมง หรือมากกว่านั้น หากกำหนดให้ ค่าความเข้มข้นของไอออนที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล ( $C_e$ ), ปริมาณไอออนหนักที่ดูดซับของวัสดุดูดซับที่จุดสมดุล ( $q$ ) ซึ่งสำหรับการเปรียบเทียบกับไอออนชนิดต่างๆ มักใช้หน่วย mmole/l และ mmole/g (น้ำหนักแห้ง) เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $q$  และ  $C_e$  เมื่อเทียบกับ Adsorption Isotherm Model เช่น Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งแบบจำลองทั้งสองจะใช้ในกรณีที่พิเศษของสารละลายคงที่เท่านั้น

- **Langmuir Isotherm**

ใช้อธิบายกระบวนการดูดซับแบบ Homogeneous Adsorption บนพื้นผิว Uniform Surface ที่เป็นเพียง Monolayer ซึ่งมี Adsorption Sites จำกัด แต่อย่างไรก็ดี มักถูกใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากความสะดวกและง่ายในการคำนวณ (Volesky, 1990) เมื่อ Langmuir Isotherm Model แสดงได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e}$$

เมื่อ	$C_e$	คือ ความเข้มข้นของไอออนที่จุดสมดุล (mg/l)
	$q_e$	คือ ปริมาณไอออนที่ดูดซับของมวลชั้วที่จุดสมดุล (mg/g)
	$q_{\max}$	คือ ค่าคงที่ของ Langmuir
	$b$	คือ ค่าคงที่ของ Langmuir

เมื่อ  $q_{\max}$  และ  $b$  แสดงให้ทราบถึงความสามารถในการดูดซับ และพลังงานในการดูดซับ ค่า  $q_{\max}$  และ  $b$  สามารถหาค่าได้โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  และ  $C_e$  จะได้ความลาดชันของกราฟมีค่าเท่ากับ  $1/q_e$  และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ  $1/b \cdot q_{\max}$

- **Freundlich Isotherm**

ใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็น Heterogeneous แต่ไม่ได้สมมติว่าเป็น Monolayer เช่น วัสดุดูดซับที่เป็นชีวมวล เช่น ผงเซลล์ของจุลินทรีย์ หรือชีวมวลอื่นๆ แสดงได้ดังสมการ

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

เมื่อ	$C_e$	คือ ความเข้มข้นของไอออนที่จุดสมดุล (mg/l)
	$q_e$	คือ ปริมาณไอออนที่ดูดซับของวัสดุดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	$k$	คือ ค่าคงที่ของ Freundlich
	$n$	คือ ค่าคงที่ของ Freundlich

เมื่อ  $k$  และ  $n$  แสดงให้ทราบถึงความสามารถในการดูดซับ และความเร็วในการดูดซับ (Adsorption Intensity) ค่า  $k$  และ  $n$  สามารถหาค่าได้โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln q_e$  และ  $\ln C_e$  จะให้ความลาดชันของกราฟมีค่าเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ  $\ln k$

ถึงแม้ว่า Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ไม่ใช่แบบจำลองที่แท้จริงในการอธิบายกระบวนการดูดซับทางชีววะ แต่เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางชีววะของ อีออนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ในทางปฏิบัติจึงมักนำแบบจำลองทั้งสองมาใช้ เนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน และให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

### 2.4.3 คอลัมน์การดูดซับแบบชั้นตรึง (Fixed-Bed Adsorption Column)

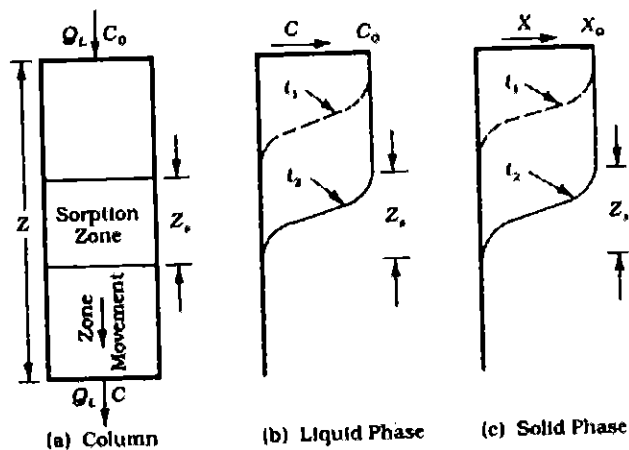
การทดสอบการดูดซับแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.7 และกราฟ Breakthrough แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในแกนตั้งและปริมาตรน้ำที่ออกในแกนนอน ความยาวของคอลัมน์บริเวณที่เกิดการดูดซับ เรียกว่า Sorption Zone ( $Z_s$ ) เป็นส่วนที่ตัวถูกละลายในของเหลวเคลื่อนที่เข้าสู่ของแข็งเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทมวลหรือเรียกว่า Mass Transfer Zone ส่วนที่อยู่เหนือขึ้นไป ตัวถูกละลายจะอยู่ในสถานะที่สมดุลกับส่วนที่ถูกดูดซับบนของแข็ง ความเข้มข้นเท่ากับ  $C_0$  และที่ส่วนนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับเท่ากับ  $X_0$  จากรูปที่ 2.8 แสดงช่วงเวลาการถ่ายเทมวล 2 ช่วงเวลา คือ  $t_1$  และ  $t_2$  ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันที่เคลื่อนที่ลงด้านล่างตามทิศทางการไหลของของเหลว ซึ่งขณะที่ Sorption Zone เคลื่อนที่ลง ตามทฤษฎีความเข้มข้นตัวถูกละลายควรมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติอาจเกิดการไหลลัดทางหรือการรั่วได้ ขณะที่ Sorption Zone เคลื่อนที่มาถึงด้านล่างของคอลัมน์ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดการ Breakthrough ดังรูปที่ 7 จนกระทั่ง Sorption Zone หายไป ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำออกจะมีค่าเท่ากับ  $C_0$  โดยทั่วไปมักกำหนดให้ Breakthrough Concentration มีค่าเป็นร้อยละ 5 ของ  $C_0$  หรือเท่ากับ  $C_b = 0.05C_0$  และค่า Exhaustion มีค่าเป็นร้อยละ 95 ของ  $C_0$  หรือเท่ากับ  $0.95C_0$  ซึ่งความยาวของ Sorption Zone สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z_s = Z \left[ \frac{V_z}{V_T - 0.5V_z} \right]$$

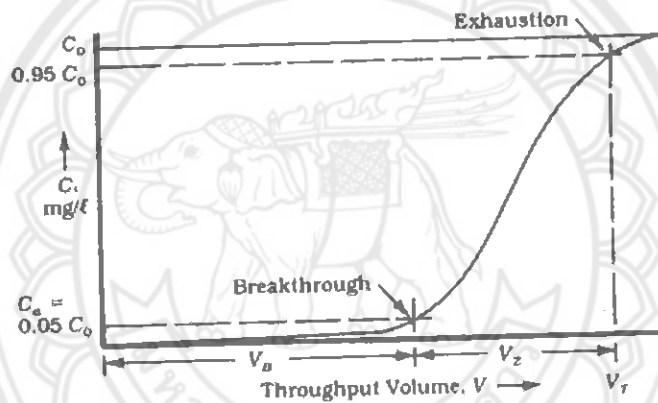
$$V_z = V_T - V_B$$

เมื่อ

$Z_s$	=	ความยาวของ Sorption Zone
$Z$	=	ความสูงของคอลัมน์
$V_T$	=	Throughput Volume
$V_B$	=	Breakthrough Volume



รูปที่ 2.7 Fixed-Bed Column (Reynolds and Richards, 1996)



รูปที่ 2.8 Breakthrough Curve (Reynolds and Richards, 1996)

พื้นที่กราฟเหนือ Breakthrough Curve แสดงปริมาณหรือมวลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้โดยคอลัมน์ และมีค่าเท่ากับ  $\int_0^V (C_0 - C) dV$

การออกแบบคอลัมน์ให้มีความถูกต้อง จำเป็นต้องอาศัยการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ การเพื่อทำ Breakthrough Curve สำหรับสารถูกดูดซับและของเหลวที่ต้องการบำบัด ซึ่งในบางตำราได้แนะนำให้ใช้วิธี Scale-Up Approach และ Kinetic Approach ทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือ Pilot Scale ก่อนที่จะนำไปออกแบบใช้งานจริง

- **Scale-Up Approach**

วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่พัฒนาโดย Fornwalt และ Hutchins ในปี ค.ศ.1966 ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบในคอลัมน์ที่มีค่าอัตราการไหล ( $Q_0$ ) ในรูปของ Bed Volume (BV) ต่อ

หน่วยเวลา มีค่าเท่ากับค่าที่จะใช้ในการออกแบบ ซึ่งระยะเวลาที่น้ำ ( $T$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $E/Q_b$  เมื่อ  $E$  คือ ส่วนของช่องว่าง (Pore Fraction) ของวัสดุดูดซับที่ใช้ ดังนั้นคอลัมน์ที่ออกแบบจึงมีค่าเวลากักน้ำเท่ากับคอลัมน์ที่ทดสอบ จึงสมมุติได้ว่าปริมาตรของของเหลวที่ถูกบำบัดต่อหน่วยสารดูดซับ ( $\hat{V}_B$ ) ของคอลัมน์ที่ทดสอบมีค่าเท่ากับคอลัมน์ที่ออกแบบ ซึ่งก่อนการทดสอบจำเป็นต้องเลือกอัตราการไหล  $Q_b$  ซึ่งโดยมากมักมีค่าเท่ากับ 0.2-0.3 BV/h สามารถคำนวณปริมาตรวัสดุดูดซับ Bed Volume ได้จาก

$$Bed\ Volume(BV) = \frac{Q}{Q_b}$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลของคอลัมน์ที่ออกแบบ และมวลทั้งหมดของสารดูดซับของคอลัมน์ที่ออกแบบ ( $M$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง เมื่อ  $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของสารดูดซับ

$$M = (BV)\rho_s$$

จากการทดสอบในคอลัมน์ จะสามารถหาค่า Breakthrough Volume ( $V_B$ ) ได้ที่จุดซึ่งมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายเท่ากับ Breakthrough Concentration ( $C_b$ ) ดังนั้น ค่าปริมาตรของของเหลวที่ถูกบำบัดต่อหน่วยสารดูดซับ ( $\hat{V}_B$ ) จึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\hat{V}_B = \frac{V_B}{m}$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของสารดูดซับที่ใช้ในคอลัมน์ที่ทดสอบ ดังนั้นมวลของสารดูดซับที่เกิดการ Exhaust ต่อชั่วโมง ( $M_t$ ) และ Breakthrough Time ( $T$ ) จะมีค่าเป็น

$$M_t = \frac{Q}{\hat{V}_B}$$

$$T = \frac{M}{M_t}$$

ดังนั้น Breakthrough Volume ของคอลัมน์ที่ออกแบบ จะมีค่าเท่ากับ อัตราการไหลที่ออกแบบคูณด้วย Breakthrough Time ซึ่งหากค่า Breakthrough Volume และ Breakthrough Time ของคอลัมน์ที่ออกแบบไม่เหมาะสม ก็จำเป็นต้องทำการทดสอบกับคอลัมน์ใหม่ โดยการเปลี่ยนค่า  $Q_b$  ที่ทดสอบแล้วคำนวณค่าต่างๆ ใหม่ ซึ่งปกติมักจะทำการทดสอบประมาณ 2 ค่า

- **Kinetic Approach**

วิธีดังกล่าวเป็นการทดสอบกับคอลัมน์ ในระดับห้องปฏิบัติการที่อัตราการไหลในรูป BV/h ใกล้เกี่ยวกับค่าที่จะใช้ในการออกแบบ ในปี ค.ศ.1948 Thomas ได้เสนอสมการ Kinetic สำหรับการดูดซับในคอลัมน์ไว้ดังนี้

$$\frac{C}{C_0} \cong \frac{1}{1 + e^{\frac{k_1(q_0M - C_0V)}{Q}}}$$

เมื่อ

C	=	ความเข้มข้นตัวถูกละลายในน้ำออก
C <sub>0</sub>	=	ความเข้มข้นตัวถูกละลายในน้ำเข้า
k <sub>1</sub>	=	อัตราคงที่ปฏิกิริยา
q <sub>0</sub>	=	ความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ
M	=	มวลของสารดูดซับ
V	=	Throughput Volume
Q	=	อัตราการไหล

สมมุติให้ทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$1 + e^{\frac{k_1(q_0M - C_0V)}{Q}} = \frac{C_0}{C}$$

จัดรูปใหม่ โดยการใส่ Natural Logarithms จะได้สมการเส้นตรงที่อยู่ในรูปของ  $y = b + mx$  หากพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C - 1)$  และ V จะได้ความชัน (m) เท่ากับ  $k_1C_0/Q$  และจุดตัดแกนตั้ง (b) เท่ากับ  $k_1q_0M/Q$

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1q_0M}{Q} - \frac{k_1C_0V}{Q}$$

ซึ่งข้อดีของวิธี Kinetic Approach ที่เหนือกว่าวิธีอื่น คือ วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่า Breakthrough Volume (V<sub>B</sub>) ที่จะใช้ในการออกแบบได้เลย ทำให้สามารถออกแบบปริมาณวัสดุดูดซับที่ต้องใช้และขนาดของถังได้ โดยที่ Breakthrough Volume ก็จะมีค่าแปรผันตามปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้



#### 2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- ความปั่นป่วน เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับ ขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านฟิล์ม และการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน ระดับความปั่นป่วนจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มน้ำที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ ส่งผลต่อความยากง่ายในการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับ

- พีเอชของสารละลาย ส่งผลต่อความสามารถในการแตกตัวของสารต่างๆ ในน้ำจึงส่งผลต่อการดูดซับด้วย เช่น จากการศึกษาของ Nigamananda et al. (2005) พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์ที่มีไททานเนียมมากจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชของสารละลายและจะมีค่าสูงสุดที่พีเอช 5.5-6.5 ขณะที่จากการศึกษาของ Tripathy et al. (2006) พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์ของ Alum-impregnated activated alumina พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์มีค่าประมาณ 99% ที่พีเอช 6.5

- อุณหภูมิ มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราเร็วสูงขึ้น แต่ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic ขณะที่ Mohan et al. (2007) อ้างว่าการเพิ่มขึ้นของการดูดซับที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจเกิดจากการเพิ่มจำนวนของ Active site surface บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ หรืออาจเกิดจากการลดลงของความหนาของ Boundary layer รอบๆ วัสดุดูดซับ ส่งผลให้ความต้านทานของ Mass transfer ของสารที่ถูกดูดซับในชั้น Boundary layer มีค่าลดลง

- ระยะเวลาพัก ค่าระยะเวลาพักน้ำที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับที่ใช้ ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ต้องควบคุมในขั้นตอนของการทดสอบ Adsorption isotherm เช่น จากการศึกษาของ Tripathy et al. (2006) พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์ของ Alum-impregnated activated alumina เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10-60 นาที และเกิดขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 92 ที่ระยะเวลา 3 ชม. ขณะที่ Nigamananda et al. (2005) พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์ที่มีไททานเนียมมากจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ระดับสูงสุดภายในระยะเวลา 90 นาที

- สมบัติของวัสดุดูดซับ สมบัติที่สำคัญ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว วัสดุดูดซับขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าและมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่า ด้วยเหตุนี้ PAC จึงมีอัตราเร็วสูงกว่า GAC ส่วนพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ คือ พื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับมากตามไปด้วย

จากการทดสอบพื้นที่ผิวด้วย  $N_2$  adsorption พบว่า AIAA มีพื้นที่ผิวที่สูงกว่า Activated alumina (AA) ถึงร้อยละ 55 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลือบผิวอย่างสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ฐานของ  $Al(OH)_3$  ของสารส้ม (Alum) บนผิวของ AA ส่งผลให้รูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นที่เชื่อว่า AA ที่ถูกเคลือบผิวด้วย  $Al(OH)_3$  จะมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่สูงขึ้น (Tripathy et al., 2006)

Nigamananda et al. (2005) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วย พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนส่งผลทำให้บ็อกไซต์ที่มีไททานเนียมมาก มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วง 120-600 °C ดังตารางที่ 7 และพบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300-400 °C ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 2.4 ผลของการบำบัดด้วยความร้อนต่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ (Nigamananda et al., 2005)

Calcination	BET Surface	Surface area
25	13.1	14.7
120	32.8	-
300	43.6	36
450	63.7	-
600	73.5	64.7
750	52.1	-
900	44.3	-

- สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดโมเลกุล การดูดติดผิวจะเกิดขึ้น ได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่พรุนของวัสดุดูดซับได้
- สารถูกดูดซับอื่นๆ เช่น อีออนบวกหรือลบที่อยู่ในสารละลาย ที่สามารถแข่งขันกันในการดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเดียวกัน เช่น ลำดับความชอบในการดูดซับอีออนของ Activated alumina ในช่วง pH 5.5-8.5 ตามที่รายงานไว้ คือ  $\text{OH}^- > \text{H}_2\text{AsO}_4^- > \text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^- > \text{HSeO}_3^- > \text{F}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > \text{I}^-$  (Farrah et al., 1987) หรือวัสดุดูดซับ Granular Ferric Hydroxide (GFH) อีออนลบอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ เรียงตามลำดับเป็น  $\text{HPO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$  ตามลำดับ (Tang et al., 2009)

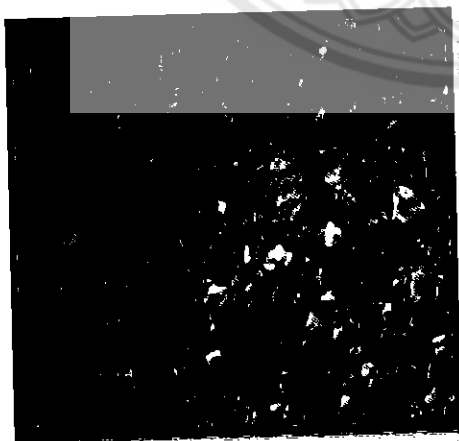
## 2.5 บ็อกไซต์ (Bauxite)

บ็อกไซต์เป็นสารผสมของไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ มีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ไม่หลอมละลาย และไม่ละลายน้ำ มีขนาดเม็ดถั่วเขียว หรืออาจถึงขนาดผลส้ม เนื้อसानแน่น มีความด่างจำเพาะอยู่ที่ 2-2.55 ตัวเนื้อบ็อกไซต์จะมีลักษณะเป็นเนื้อค้ำแบบดิน มีส่วนประกอบเป็นไฮด์รอกไซด์ (Gibbsite) เบอห์ไมต์ (Boehmite) และ ไดแอสפור (Diaspore) มีกำเนิดแบบ Supergene ในลักษณะภูมิอากาศกึ่งเขตร้อนถึงเขตร้อน โดยมีการผุสลายและซึมชะซึลิกจากหินที่มีอลูมิเนียมหรือพวกแอลคาไล เช่น Na, K, Mg, Ca ประกอบอยู่ออกไป นอกจากนี้ยังอาจมาจากการ ผุสลายของดินที่มีหินปูน เกิดในลักษณะตกตะกอนเป็นเม็ดๆ อาจเกิดใน ที่โดยมาจากหินต้นกำเนิดโดยตรงหรือถูกพัดพามา

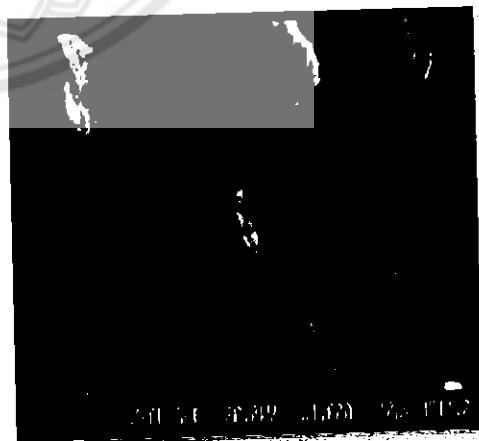
สะสมในชั้นหินตะกอน ในแหล่งเขตร้อนจะเป็นศิลาแลง Laterites ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียม และเหล็กออกไซด์ ทั้งนี้โดยมีส่วนประกอบผันแปรต่างๆ กันแต่ละแห่ง

บ็อกไซต์เป็นสินแร่อะลูมิเนียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องบินและรถไฟ โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา รวมทั้งเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมผลิตอะลูมินา ให้แก่อุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป ได้แก่ วัสดุขัดผิว, ซีเมนต์, การผสมและการหลอมโลหะ นอกจากนี้บ็อกไซต์ยังใช้ในอุตสาหกรรมสี อะลูมิเนียมฟรอยด์ และอื่นๆ ขณะที่ปัจจุบันอะลูมินากำลังจะมาแทนที่ทองแดงในงานสายส่งกระแสไฟฟ้า (กรมทรัพยากรธรณี, ม.ป.ป.)

บ็อกไซต์เป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตสารส้ม ดังรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งเป็นบ็อกไซต์ตามธรรมชาติ และรูปที่ 2.9 (ข) เป็นภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน บ็อกไซต์มีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น Gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), Boehmite ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ ) และ Diaspore ( $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ ) รวมทั้งองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Goethite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), Rutile/Anatase ( $\text{TiO}_2$ ), Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) และสารเจือปนอื่นๆ ในปริมาณน้อย (Liu et al., 2009) บ็อกไซต์มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบด้วยออกไซด์ของอะลูมิเนียม, เหล็กและซิลิกอนในรูปของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 56.9, 16.9 และ 8.6 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของไททานเนียม, วาเนเดียม และแคลเซียม ดังตารางที่ 5 ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของบ็อกไซต์ในประเทศตุรกี (Erdem et al., 2004) และมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับบ็อกไซต์ในประเทศจีนซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญเป็น  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 55-65, 3-19 และ 6-15 ตามลำดับ (Liu et al., 2009)



ก) บ็อกไซต์



ข) ภาพถ่าย SEM

รูปที่ 2.9 บ็อกไซต์ และรูปถ่ายแบบ SEM (Baral et al. (2007))

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Das et al. (2005) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่มโดยใช้ Activated titanium rich bauxite (TRB) ทำการทดสอบการดูดซับแบบที่ละเท ศึกษาผลของระยะเวลาพัก, พีเอช, ปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้, ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ และผลของอิออนลบอื่นๆ ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดภายในช่วงระยะเวลา 90 นาที pH ที่เหมาะสมแก่การดูดซับอยู่ในช่วง 5.5-6.5 ความสามารถดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดประมาณ 4.13 มก./ก. และพบว่าการกระตุ้นทางกายภาพด้วยความร้อนที่ 300-450°C จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอิออนลบอื่นๆ ที่พบในน้ำดื่มไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของ TRB อย่างมีนัยสำคัญ

Nigamananda et al. (2005) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่มโดยใช้บ็อกไซต์ที่มีไททาเนียมสูง (Titanium rich bauxite) ในประเทศอินเดีย พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300-400 °C ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากความร้อนส่งผลให้พื้นที่ผิวของบ็อกไซต์ที่มีไททาเนียมสูงมีค่าสูงขึ้น และอัตราการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดภายในระยะเวลา 90 นาที การดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้นตามพีเอชของสารละลาย และมีค่าสูงสุดที่พีเอช 5.5-6.5 กลไกการดูดซับสอดคล้องกับ 1<sup>st</sup> order rate expression และข้อมูลสมดุลการดูดซับสอดคล้องทั้ง Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm จากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้ม จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิตสารส้ม ดังตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากกระบวนการผลิตสารส้มที่ผลิตจากคาโอไลน์ จากองค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีออกไซด์ของซิลิกอน (SiO<sub>2</sub>) และคาโอไลน์เป็นองค์ประกอบหลัก คือประมาณร้อยละ 40.0 และ 8.9 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังรายงานว่ากากของเสียจากกระบวนการผลิตดังกล่าวปราศจากสารอันตรายจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ได้อย่างปลอดภัย (Nigussie et al., 2007)

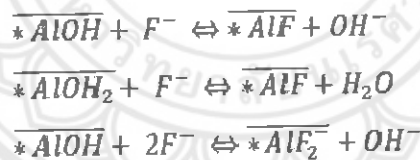
Chemical composition	Percent (wt.%)
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	39.991
Kaolin	8.883
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	1.778
Al(OH) <sub>3</sub>	0.878
CaSO <sub>4</sub>	0.194
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0.023
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.001
MgSO <sub>4</sub>	0.008
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.007
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.005

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากคาโอไลน์

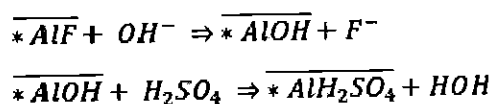
(Nigussie et al., 2007)

Nigussie et al. (2007) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้กากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากลาโอลินใน จากโรงงานผลิตสารส้มและกรดซัลฟูริกในเอธิโอเปีย โดยรวบรวมกากของเสียที่ได้มาทำการตากแห้งและบดให้มีขนาด 0.5-0.8 มม. ทำการทดสอบการดูดซับแบบที่ละเทศึกษาผลของระยะเวลาพัก, พีเอช, ปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้, ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ และผลของอิออนลบอื่นๆ ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า กากของเสียดังกล่าวมีความสามารถดูดซับสูงสุด 153.8 มก./ก. การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกและเข้าสู่สมดุลในระยะเวลาประมาณ 1 ชม. ปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมเป็น 16 ก./ล. สำหรับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 10 มก./ล. ความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์อยู่ในระดับคงที่ในช่วง pH 3-8 นอกจากนี้ยังพบว่าอิออนลบของไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 100-500 มก./ล. จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ขณะที่อิออนลบของคลอไรด์, ซัลเฟต, ฟอสเฟต และไนเตรต ไม่มีผลต่อการดูดซับในช่วงที่ทำการศึกษาย่างมีนัยสำคัญ

Ghorai and Pant (2004) กล่าวว่า กลไกหลักในการกำจัดฟลูออไรด์ของอะลูมินาเป็นผลมาจากกระบวนการแลกเปลี่ยนอิออน สามารถอธิบายได้ดังสมการ โดยที่สมการที่ 3 จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีความเข้มข้นของ Fluoride loading rate ต่อหน่วยน้ำหนักของ Activated alumina มีค่าสูง โดยที่ Al แสดงถึงพื้นที่ผิว และเครื่องหมายบาร์ด้านบนหมายถึง Solid phase ของ Activated alumina ซึ่งจากการทดสอบพบว่า Activated alumina ที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ประมาณ 1,450 มก.ฟลูออไรด์/กก. ที่ pH 7



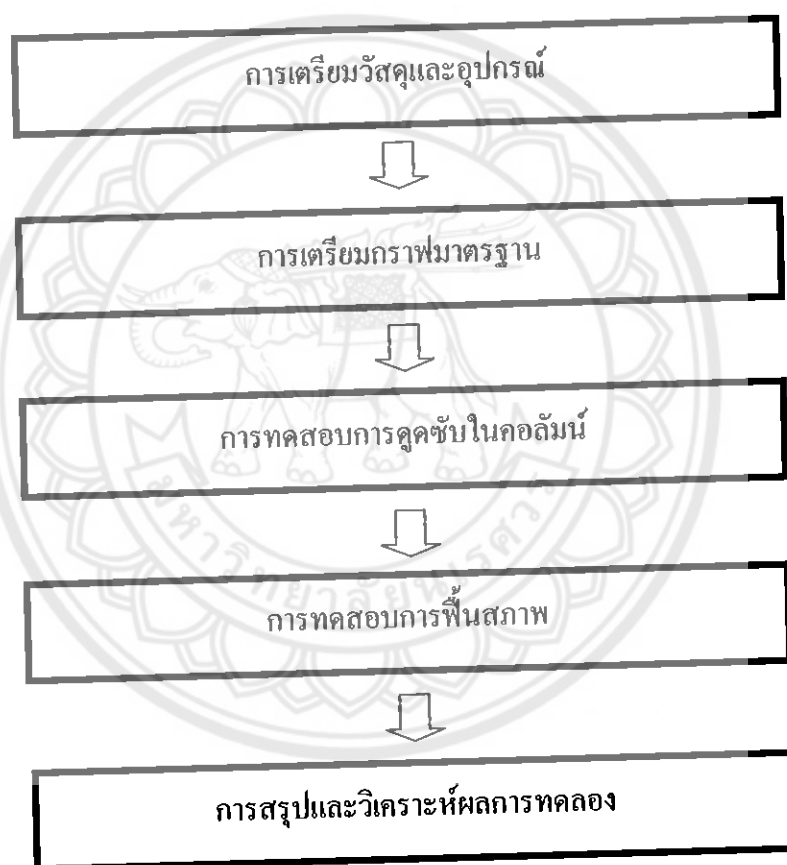
เมื่อหมดสภาพ การฟื้นฟูสภาพสามารถทำได้ด้วยการใช้สารละลายต่าง เช่น NaOH โดยใช้อิออนลบของไฮดรอกไซด์แทนที่อิออนลบของฟลูออไรด์ในโครงสร้างของ Activated alumina และตามด้วยการ Activation ด้วยสารละลายกรดคั่งสมการด้านล่าง โดยที่ความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 5 ต่อครั้งที่ทำการฟื้นฟูสภาพ (Ghorai and Pant, 2004)



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินโครงการ

การศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์โดยดูดซับในคอลัมน์แบบชั้นตรง ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับของฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์ในคอลัมน์แบบ ไหลต่อเนื่อง แล้วทดสอบการฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายค่างและกรด และเพื่อเป็นแนวทางในการ ออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์ขนาดเล็กสำหรับบ้านเรือน โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1 ด้านล่าง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

#### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.1.1.1 สารเคมี

- SPADNS (Sodium 2-(parasulfophenylazo)-1,8-Dihydroxy-3,6-Naphthalene-disulfonate)
- Hydrochloric Acid Zirconyl chloride
- Sodium fluoride (NaF)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

##### 3.1.1.2 เครื่องแก้ว

- บีเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร
- บีเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- ลูกยางดูดสารเคมี
- ขวดเก็บสารเคมีสีชา ขนาด 1 ลิตร
- ขวดเก็บสารเคมี ขนาด 1 ลิตร
- กระจกตวง ขนาด 25 มิลลิลิตร
- ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1 ลิตร
- ขวดรูปชมพู่
- ขวดพลาสติกเก็บน้ำตัวอย่าง
- ถาดอลูมิเนียม
- ตะกร้าพลาสติก

##### 3.1.1.3 เครื่องมือ

- เครื่องหมุนเหวี่ยงสาร (Centrifuge)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)
- เครื่องสูบน้ำแบบรีด (Peristaltic pump)
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- ตู้อบ (Hot air oven)
- ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 10 และ 16
- ค้อนเหล็ก

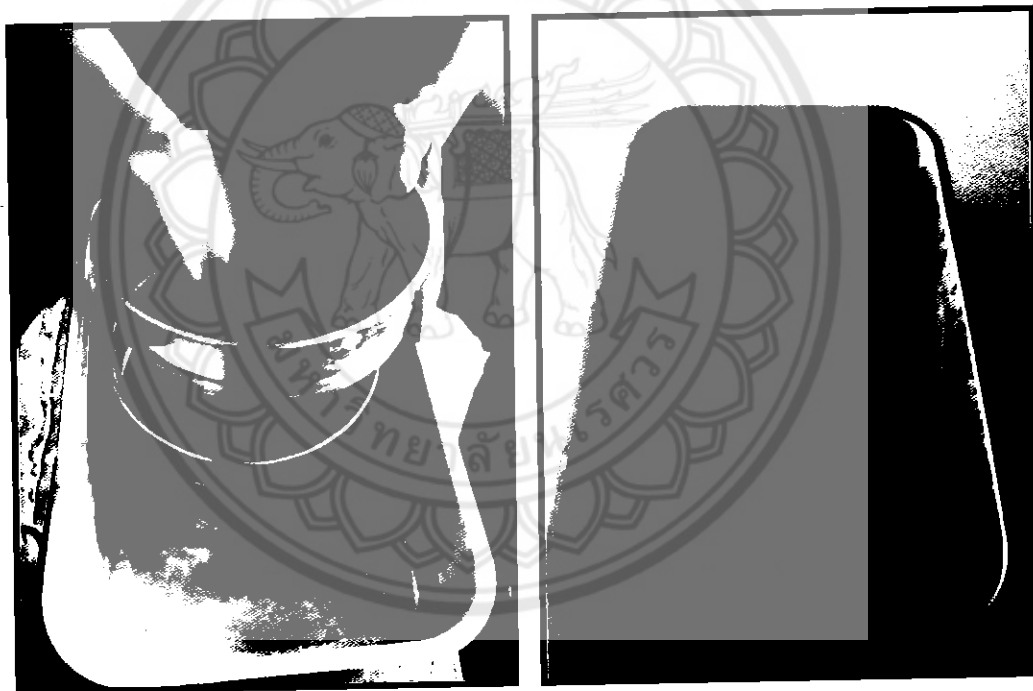
### การเตรียมบ็อกไซท์

3.1.1.4 บ็อกไซท์ที่ใช้ในการศึกษารังนี้ี้ ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัททำไทย จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตสารส้ม ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 เซนติเมตร จึงมีขนาดใหญ่เกินไป จำเป็นต้องทำการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำมาใช้งาน ดังรูปที่ 3.2

3.1.1.5 ทำการบดด้วยค้อน และคัดขนาดที่เหมาะสมโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน ขนาดเบอร์ 10 และ 16 นำมาร่อนเพื่อเอาบ็อกไซท์ โดยจะได้บ็อกไซท์ขนาด 1-2 มิลลิเมตร

3.1.1.6 นำบ็อกไซท์ที่มีขนาดที่เหมาะสมแล้ว มาอบที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกจกตัวบ็อกไซท์

3.1.1.7 นำบ็อกไซท์ที่ผ่านการอบมาแล้วทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเก็บใส่ถุงซิปลาสติกปิดสนิท เพื่อป้องกันความชื้น เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 3.2 การเตรียมบ็อกไซท์

### 3.1.2 การเตรียมคอลัมน์ดูดซับ

3.1.2.1 ทำการพัฒนาคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษารังนี้ี้เอง โดยใช้ท่อพลาสติก PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (2.9 เซนติเมตร) ตัดให้มีความยาว 40 เซนติเมตร มาทำเป็นคอลัมน์ อดปลายทั้ง 2 ด้านด้วยหัวอุด PVC ขนาด 1 นิ้ว และทำการเจาะรูด้วยสว่าน เพื่อติดตั้งท่อน้ำเข้าและออก โดยใช้ข้อต่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว เข้ากับปลายทั้ง 2 ด้าน และต่อด้วยสายยาง เพื่อเป็นทางน้ำเข้าและน้ำออก

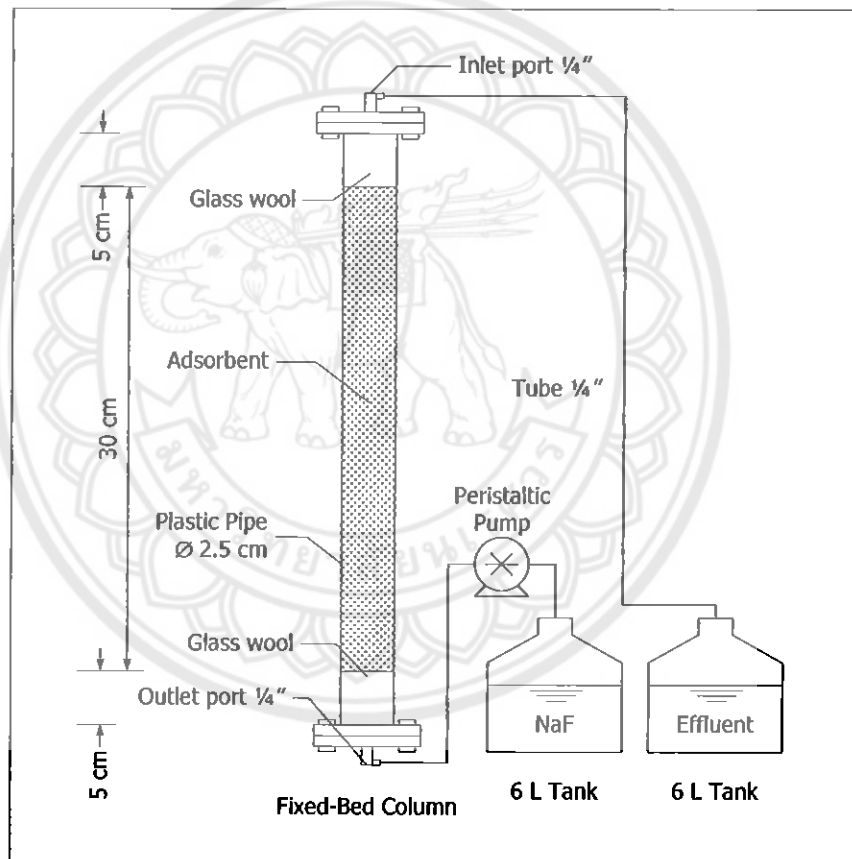


3.1.2.2 บรรจุใยแก้ว (Glass wool) ที่ด้านล่างของคอลัมน์ ให้มีความสูงประมาณ 5 ซม. เพื่อการกระจายน้ำที่ดี

3.1.2.3 บรรจุบอไซท์ที่ซั่งน้ำหนักไว้แล้ว ลงในคอลัมน์ ให้ได้ความสูงของบอไซท์ประมาณ 30 เซนติเมตร

3.1.2.4 บรรจุใยแก้วที่ด้านบนของคอลัมน์ ให้มีความสูงประมาณ 5 ซม. เพื่อกรองไม่ให้บอไซท์หลุดไปกับน้ำออก

3.1.2.5 ปิดหัวอุด PVC ที่ปลายคอลัมน์ทั้งบนและล่างให้แน่น และติดตั้งท่อน้ำเข้ากับเครื่องสูบลมเปรีด ให้ปลายอีกด้านจุ่มอยู่ในถังน้ำเข้า และต่อท่อน้ำออกจากคอลัมน์ไปยังถังรับน้ำออก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของคอลัมน์ดูดซับ

### 3.1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์

ซั่ง โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) มาจำนวน 0.0553 กรัม มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 5 ลิตร จะได้สารละลายฟลูออไรด์มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเก็บไว้ในขวดพลาสติกขนาด 6 ลิตร เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

## 3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์

### 3.2.1 สารละลาย SPADNS

ละลาย SPADNS (Sodium 2-(parasulfophenylazo)-1, 8-Dihydroxy-3, 6-Naphthalene-disulfonate) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า 4, 5-Dihydroxy-3-(Parasulfophenylazo)-2, 7 Naphthalene-disulfonic Acid Trisodium Salt จำนวน 958 มก. ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 500 มล. สารละลายนี้สามารถเก็บได้นานอย่างน้อย 1 ปี ถ้าป้องกันไม่ให้ถูกแสง

### 3.2.2 สารละลายกรดเซอร์โคเนียล (Zirconyl-Acid Reagent)

ละลายเซอร์โคเนียลคลอไรด์ (Zirconyl Chloride Octahydrate,  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ) 133 มก. ในน้ำกลั่น 25 มล. เติมน้ำไฮโดรคลอริกเข้มข้น 350 มล. แล้วเจือจางเป็น 500 มล. ด้วยน้ำกลั่น

### 3.2.3 สารละลายผสม Acid Zirconyl-SPADNS

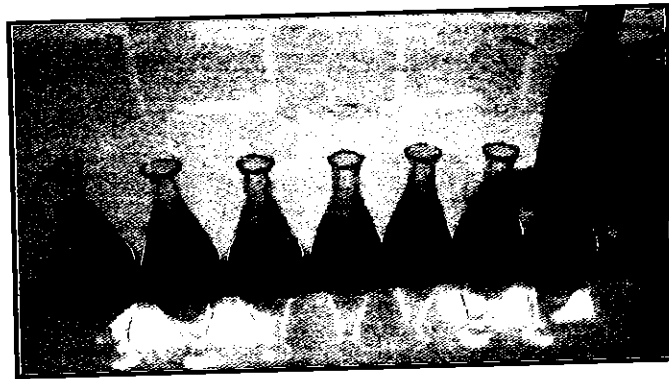
ผสมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอร์โคเนียลอย่างละเท่าๆกัน สารละลายผสมนี้เก็บรักษาได้อย่างน้อย 2 ปี

### 3.2.4 สารละลายอ้างอิง

เจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 7 มล. ด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10 มล. แล้วเติมลงในสารละลายเจือจาง SPADNS ที่เกิดจากการเติมสารละลาย SPADNS 10 มล. ลงในน้ำกลั่น 100 มล. สารละลายที่ได้นี้จะใช้ปรับเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้เป็น 100%T (หรือเท่ากับ Blank) สารละลายนี้คงตัวเก็บได้นานอย่างน้อย 1 ปี

### 3.2.5 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมอนุกรมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ให้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครกรัม โดยเปิดสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ (1 มล. เท่ากับ  $10 \mu g F^-$ ) มา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มล. ลงใน Nessler tube ขนาด 50 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 50 มล. เติมน้ำในขวดรูปกรวยแล้วเติมสารละลายผสม Acid Zirconyl-SPADNS 10 มล. ลงในทุกขวด เขย่าให้เข้ากันหรืออาจเติมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอร์โคเนียลอย่างละ 5 มล. เขย่าให้เข้ากัน นำไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายอ้างอิงเป็นแบลนด์ในการปรับ 100% T ของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็นไมโครกรัมและ %T ที่อ่านได้จากแต่ละความเข้มข้น โดยใช้กราฟ SEMILOG



รูป 3.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

### 3.3 การทดสอบการดูดซับในคอลัมน์

- 3.3.1 นำสารละลายความเข้มข้นฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัม/ลิตร มาเตรียมไว้
- 3.3.2 นำเครื่องสูบลมแบบรีด สูบตัวอย่างสารละลายเข้าไปในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ ปรับอัตราการไหลของเครื่องสูบลมแบบรีดให้ได้อัตราการไหลตามที่ต้องการ คือ 1BV/hr และ 2BV/hr
- 3.3.3 เก็บน้ำตัวอย่าง ครึ่งละ 20 มิลลิลิตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง ใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มล. พร้อมกับบันทึกปริมาตรน้ำที่ออกสะสม
- 3.3.4 นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านวัสดุดูดซับมาวิเคราะห์ฟลูออไรด์ตามวิธีมาตรฐาน โดยทำการเติมสารละลาย SPADNS และกรดเซอ โคนิต อย่างละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 3.3.5 นำน้ำตัวอย่างที่ได้ ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร
- 3.3.6 นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการของกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็น มก./ล.
- 3.3.7 ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ออกสะสม และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออก ต่อเนื่องกัน และระบุจุด Breakthrough ที่เกิดขึ้นของวัสดุดูดซับที่ใช้ ที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็น 1 มก./ล. ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ และระบุจุดที่เกิดการ Exhaust ของวัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็น 5 มก./ล.

### 3.4 การทดสอบการฟื้นฟูสภาพ

- 3.4.1 นำบ็อกไซต์ที่ใช้แล้วเทออกจากคอลัมน์ แล้วทำการฟื้นฟูสภาพตามวิธีของ Ghorai and Pant (2005) โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 500 ml โดยแช่บ็อกไซต์ในขวดแก้วเก็บสารเคมีขนาด 1 ลิตร ให้ท่วมตัวอย่าง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจน

มีสภาพเป็นกลาง แล้วแช่บ็อกไซต์ด้วยสารละลาย  $H_2SO_4$  ความเข้มข้น 0.4 N ปริมาตร 500 ml เป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลาง

3.4.2 นำบ็อกไซต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว มาอบที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่ความชื้นออกจากบ็อกไซต์

3.4.3 นำบ็อกไซต์ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว บรรจุในคอลัมน์ และทำการทดสอบการดูดซับในคอลัมน์อีกครั้งหนึ่ง โดยดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 3.3 ที่อัตราการไหลตามที่ต้องการ คือ 1BV/hr และ 2BV/hr

### 3.5 การสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยทำการออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์ขนาดเล็กสำหรับบ้าน 1 หลัง (ผู้อยู่อาศัย 4 คน) ซึ่งหากกำหนดให้ใช้อัตราน้ำใช้รายวันเฉลี่ยมีค่าเป็น 200 ลิตร/คน-วัน โดยคิดเป็นปริมาณน้ำสำหรับบริโภคร้อยละ 3.7 ดังนั้นสำหรับบ้านที่มีผู้อยู่อาศัย 4 คน จะมีปริมาณน้ำที่ใช้บริโภคเท่ากับ 30 ลิตร/วัน

นำผลการทดสอบจากขั้นตอนที่ 3.3 และ 3.4 มาออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์ โดยใช้วิธี Kinetic Approach ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 เพื่อคำนวณค่าคงที่ของสมการดังกล่าว แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปแทนค่าเพื่อคำนวณปริมาณบ็อกไซต์ที่ใช้เป็นกิโลกรัม ในการกำจัดฟลูออไรด์ให้ได้ระยะเวลาาน 1 วัน, 1 สัปดาห์ หรือ 1 เดือน ตามลำดับ ที่อัตราการไหลในรูปของ BV/hr เช่นเดียวกับที่ทดสอบในคอลัมน์ในห้องปฏิบัติการ

## บทที่ 4

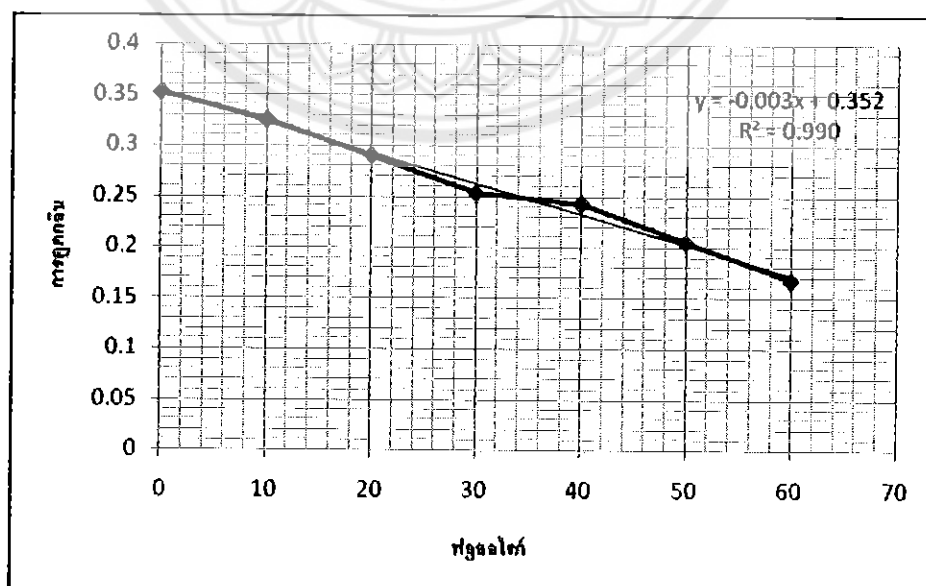
### ผลการดำเนินงาน

จากการทดสอบการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซด์ในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นครึ่ง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับของฟลูออไรด์และเพื่อเป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์สำหรับบ้านเรือนขนาดเล็ก โดยทำการทดสอบในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.9 ซม. บรรจุบ็อกไซด์สูง 30 ซม. ปริมาณ 0.25 กก. ทดสอบที่อัตราการไหล 1BV/hr และ 2BV/hr หลังจากนั้นนำบ็อกไซด์มาทำการฟื้นฟูสภาพ 1 ครั้ง แล้วนำกลับมาบรรจุในคอลัมน์และศึกษาการดูดซับซ้ำอีกครั้ง ที่อัตราการไหล 1BV/hr และ 2BV/hr ได้ผลการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์

จากการทดลองได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หาค่าฟลูออไรด์ที่ได้จากน้ำตัวอย่าง โดยทำการเก็บน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ทุกๆ ชั่วโมง ค่อยๆ กัน และวิเคราะห์ฟลูออไรด์ด้วยวิธี SPADNS ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

กราฟมาตรฐานได้จากการเตรียมอนุกรมของสารละลายฟลูออไรด์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน แล้วมาทำการวัดฟลูออไรด์ด้วยวิธี SPADNS เพื่อนำค่าที่ได้ไปสร้างเป็นกราฟมาตรฐานฟลูออไรด์ ดังรูปที่ 4.1

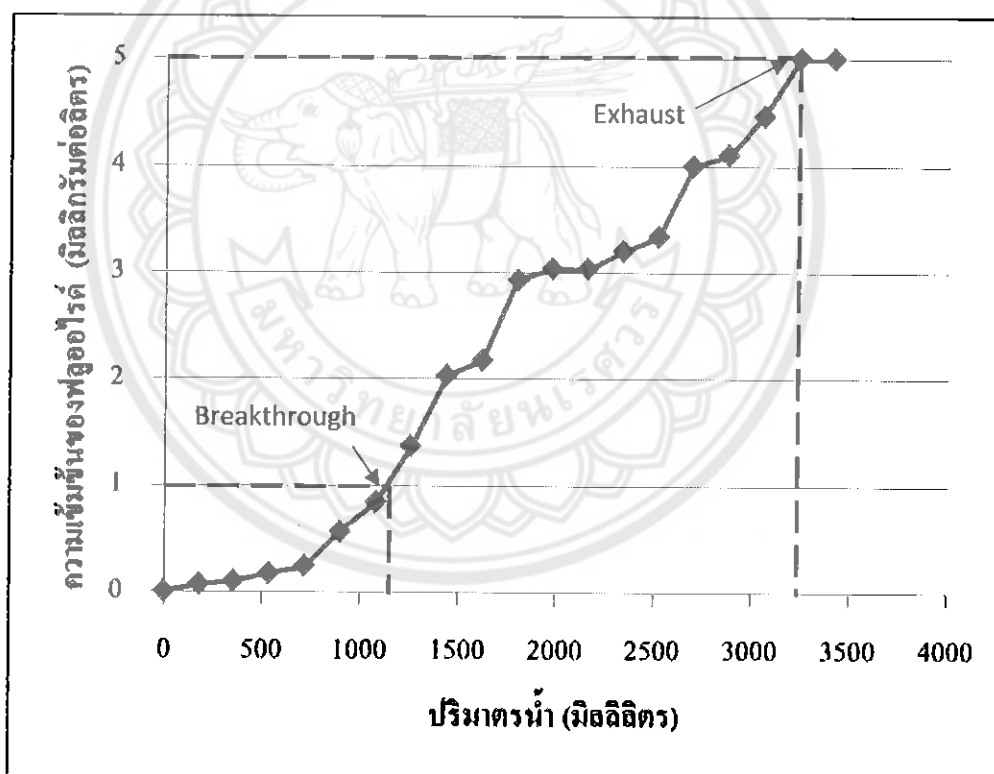


รูป 4.1 กราฟมาตรฐานของฟลูออไรด์

## 4.2 ผลการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์

### 4.2.1 ผลการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ที่อัตราการไหล 1BV/hr

จากการทดลองได้กำหนดอัตราการไหลของน้ำที่ 1BV/hr (คิดเป็นอัตราการไหลเท่ากับ 3 มิลลิลิตร/นาที่) เมื่อทำการป้อนสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร เข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง แล้วเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 20 มิลลิลิตรทุกๆ ชั่วโมง ใส่ขวดพลาสติก นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ฟลูออไรด์ด้วยวิธี SPADNS หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสะสมที่ออกจากคอลัมน์และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์จะมีค่าค่อยๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาที่ทดสอบ จนกระทั่งถึงจุดๆ หนึ่งที่บ็อกไซต์ไม่สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้อีก ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกก็จะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำที่เข้าคอลัมน์



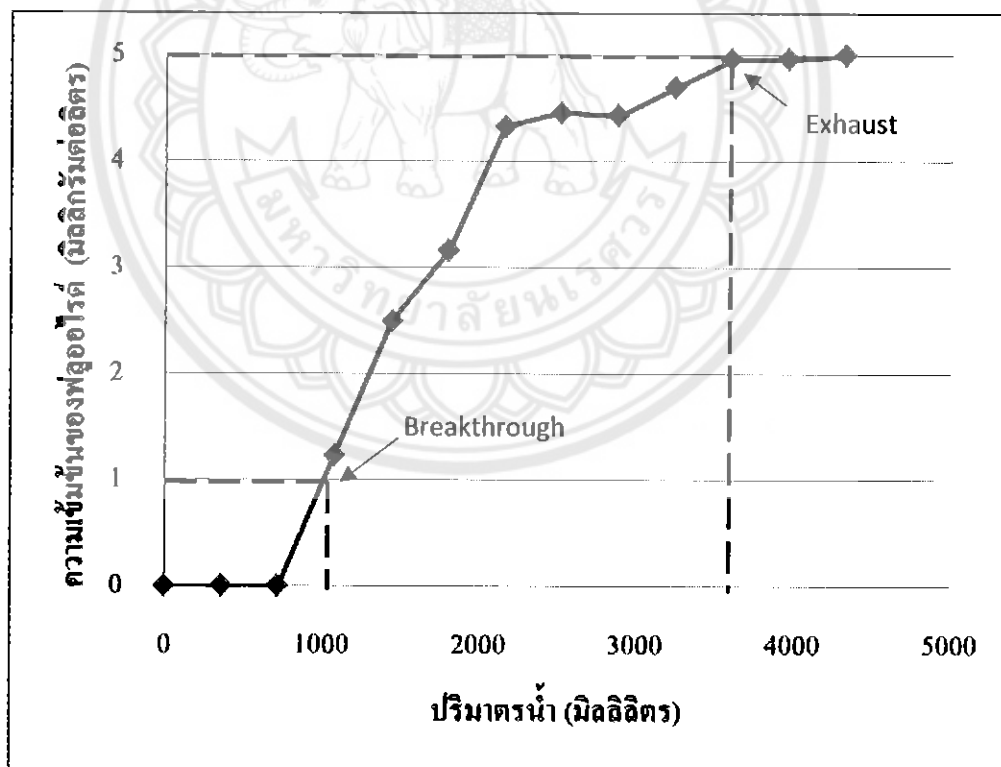
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ที่อัตราการไหล 1BV/hr

จากผลของการทดลองดังรูปที่ 4.2 ที่อัตราการไหล 1 BV/hr และกำหนดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกไม่เกินเท่ากับ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของฟลูออไรด์สำหรับน้ำดื่ม จะพบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีค่าเท่ากับ 1,100 มิลลิลิตร และพบว่า

ปริมาณน้ำที่จุด Exhaust มีค่าเท่ากับ 3,240 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นจุดที่น้ำออกมีค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า คือ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

#### 4.2.2 ผลการทดลองการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์ที่อัตราการไหล 2BV/hr

จากการทดลองได้กำหนดอัตราการไหลของน้ำที่ 2BV/hr (คิดเป็นอัตราการไหลเท่ากับ 6 มิลลิลิตร/นาที) เมื่อทำการป้อนสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร เข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง แล้วเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 20 มิลลิลิตรทุกๆ ชั่วโมง ใส่ขวดพลาสติก นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ฟลูออไรด์ด้วยวิธี SPADNS หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสะสมที่ออกจากคอลัมน์และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์จะมีค่าค่อยๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาที่ทดสอบ จนกระทั่งถึงจุดๆ หนึ่งที่บ็อกไซด์ไม่สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้อีก ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกก็จะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำที่เข้าคอลัมน์



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์ที่อัตราการไหล 2BV/hr

จากผลของการทดลองดังรูปที่ 4.3 ที่อัตราการไหล 2BV/hr และกำหนดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกไม่เกินเท่ากับ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของฟลูออไรด์สำหรับน้ำดื่ม จะพบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีค่าเท่ากับ 1,010 มิลลิลิตร และพบว่า

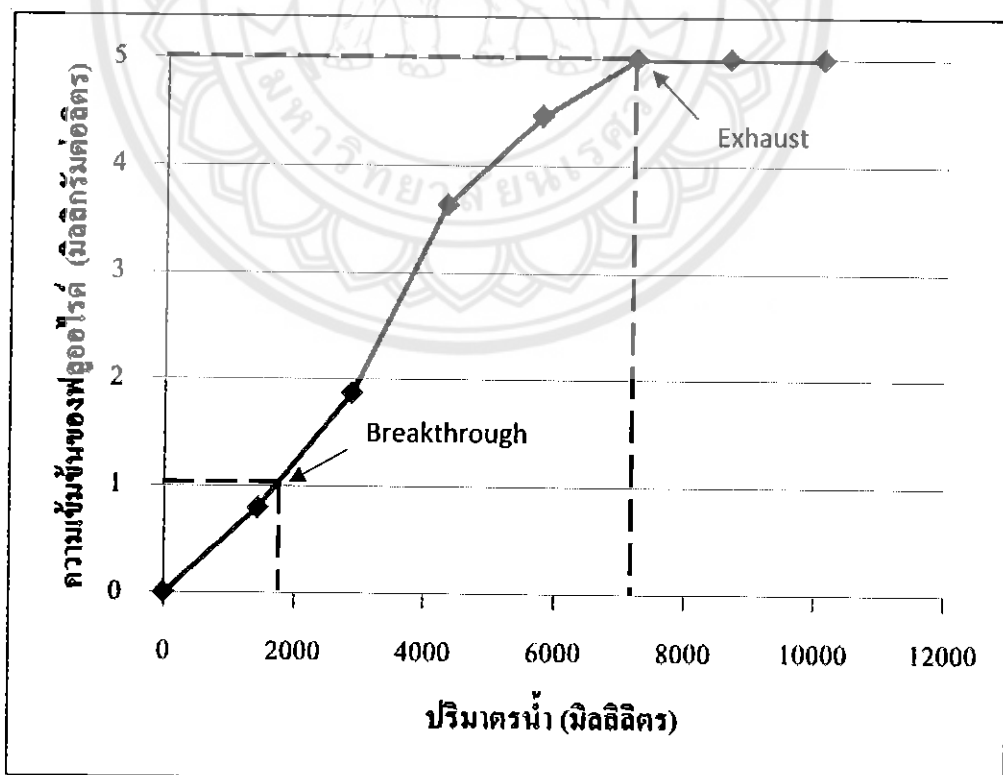
ปริมาณน้ำที่จุด Exhaust มีค่าเท่ากับ 3,600 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นจุดที่น้ำออกมีค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า คือ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อเปรียบเทียบผลของการทดลองที่อัตราการไหล 1 BV/hr และ 2 BV/hr พบว่าปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีค่าเท่ากับ 1,100 และ 1,010 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีไม่แตกต่างกันมากนัก

### 4.3 ผลการทดสอบการฟื้นฟูสภาพ

#### 4.3.1 ผลการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้วที่อัตราการไหล 1 BV/hr

จากการทดลองได้นำบ็อกไซต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ 1 BV/hr จากขั้นตอนที่ 4.1.2 ทำการฟื้นฟูสภาพตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในแผนการทดลอง โดยแช่ NaOH ความเข้มข้น 0.1N ปริมาตร 500 มิลลิลิตรเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในขวดแก้วเก็บสารเคมีขนาด 1 ลิตร หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น จนมีสภาพเป็นกลาง แล้วแช่ด้วย  $H_2SO_4$  ความเข้มข้น 0.4N ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง แล้วนำมาล้างให้ค่า pH เป็นกลาง แล้วอบด้วยอุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงนำมาบรรจุในคอลัมน์ แล้วจึงทำการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ เช่นเดิมที่อัตราการไหลไปที่ 1 BV/hr (3 มิลลิลิตร/นาที) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว ที่อัตราการไหล 1BV/hr



จากผลของการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว ดังรูปที่ 4.4 ที่อัตราการไหล 1BV/hr และกำหนดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกไม่เกินเท่ากับ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของฟลูออไรด์สำหรับน้ำดื่ม จะพบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีค่าเท่ากับ 1,600 มิลลิลิตร และพบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Exhaust มีค่าเท่ากับ 7,200 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นจุดที่น้ำออกมีค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า คือ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์และบ็อกไซด์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้วด้วยสารละลายต่างและกรด ที่อัตราการไหลเดียวกัน คือ 1BV/hr พบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีเพิ่มขึ้นจาก 1,100 มิลลิลิตร เป็น 1,600 มิลลิลิตร คือ สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้นานขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผลของการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างเพื่อดึงฟลูออไรด์ออกจากบ็อกไซด์และอาจเกิดจากการปรับสภาพผิวบ็อกไซด์ด้วยกรด จึงทำให้บ็อกไซด์สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้เพิ่มมากขึ้น

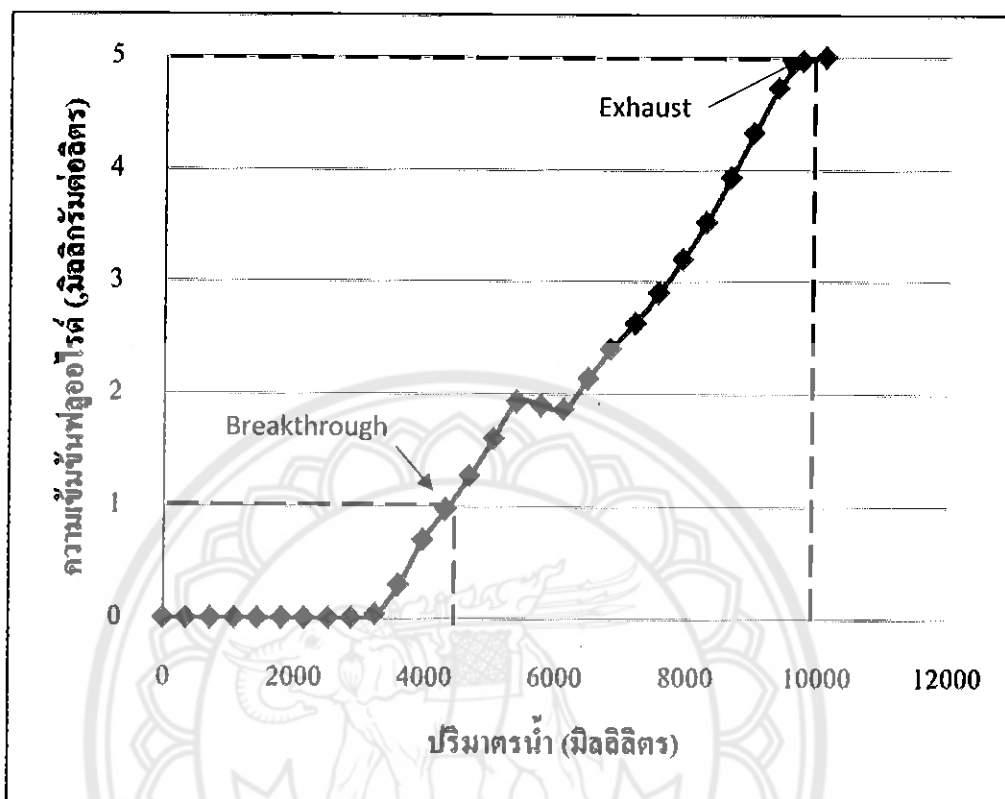
#### 4.3.2 ผลการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้วที่อัตราการไหล 2BV/hr

จากการทดลองได้นำบ็อกไซด์ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ 2BV/hr จากขั้นตอนที่ 4.1.3 ทำการฟื้นฟูสภาพตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในแผนการทดลอง โดยแช่ NaOH ความเข้มข้น 0.1N ปริมาตร 500 มิลลิลิตรเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในขวดแก้วเก็บสารเคมีขนาด 1 ลิตร หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลาง แล้วแช่ด้วย  $H_2SO_4$  ความเข้มข้น 0.4N ปริมาตร 500 มิลลิลิตร เป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง แล้วนำมาล้างให้ค่า pH เป็นกลาง แล้วอบด้วยอุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงนำมาบรรจุในคอลัมน์ แล้วจึงทำการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ เช่นเดิมที่อัตราการไหลไปที่ 2BV/hr (6 มิลลิลิตร/นาที) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.5

จากผลของการทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว ดังรูปที่ 4.5 ที่อัตราการไหล 2BV/hr และกำหนดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกไม่เกินเท่ากับ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของฟลูออไรด์สำหรับน้ำดื่ม จะพบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีค่าเท่ากับ 4,230 มิลลิลิตร และพบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Exhaust มีค่าเท่ากับ 9,700 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นจุดที่น้ำออกมีค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า คือ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซด์และบ็อกไซด์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้วด้วยสารละลายต่างและกรด ที่อัตราการไหลเดียวกัน คือ 2BV/hr พบว่า ปริมาณน้ำที่จุด Breakthrough มีเพิ่มขึ้นจาก 1,010 มิลลิลิตร เป็น 4,230 มิลลิลิตร คือ สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้นานขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผลของการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างเพื่อดึงฟลูออไรด์ออกจากบ็อกไซด์

และอาจเกิดจากการปรับสภาพผิวบ็อกไซต์ด้วยกรด จึงทำให้บ็อกไซต์สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว ที่อัตราการไหล 2BV/hr

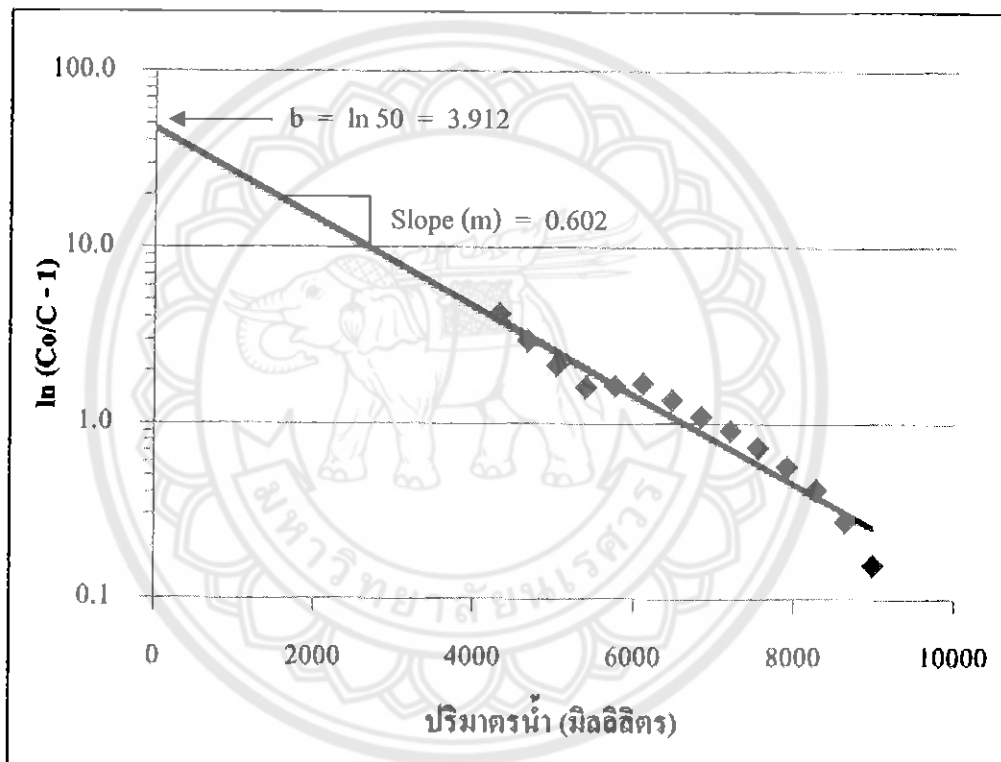
#### 4.4 ผลการออกแบบระบบดูดซับฟลูออไรด์ขนาดเล็ก

การออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์สำหรับบ้านเรือนขนาดเล็ก เลือกใช้ผลการทดสอบคอลัมน์ดูดซับฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว ที่อัตราการไหลเท่ากับ 2BV/hr (0.396 ลบ.ม./ชม.) ซึ่งใช้คอลัมน์สูง 30 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.9 ซม. บรรจุบ็อกไซต์ปริมาณ 0.25 กก. ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้น ( $C_0$ ) เท่ากับ 5 มก./ล. จากผลการทดสอบพบว่า Breakthrough Volume เท่ากับ 4.23 ลิตร ดังรูปที่ 4.5 มาใช้ในการออกแบบ

ออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์สำหรับบ้านเรือนขนาดเล็ก (4 คน/หลังคาเรือน) โดยกำหนดให้อัตราการใช้น้ำเฉลี่ยเท่ากับ 200 ลิตร/คน.วัน และอัตราการใช้น้ำเพื่อการบริโภคเท่ากับร้อยละ 3.4 ของอัตราการใช้น้ำเฉลี่ย (Qasim et al., 2000)

อัตราการใช้น้ำเฉลี่ย/หลังคาเรือน	=	4 (คน) x 200 (ลิตร/คน.วัน)
	=	800 ลิตร/วัน
อัตราการใช้น้ำเพื่อการบริโภค	=	(3.4/100)x800 ลิตร/วัน
	=	27.2 ลิตร/วัน
เลือกใช้อัตราการใช้น้ำเพื่อการบริโภค	=	30 ลิตร/วัน

จากผลการทดสอบทดสอบคอลัมน์ดูดซับดังกล่าว เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C - 1)$  และปริมาณน้ำออกสะสม จะได้กราฟเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.6 คำนวณค่าจุดตัดแกนตั้ง (b) และ slope (m) ของกราฟ เพื่อคำนวณค่าคงที่ของสมการ ดังนี้



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_0/C - 1)$  และปริมาณน้ำสะสม

	จุดตัดแกนตั้ง (b)	=	$\ln(50) =$	3.912
	ความลาดชัน (m)	=	0.602	ลิตร <sup>-1</sup>
จากสมการ	$k_1$	=	$mQ/C_0$	
จะได้	$k_1$	=	$0.602 \times (0.396/3600) / (5 \times 10^{-6})$	
		=	13.244	ลิตร/กก.วินาที
จากสมการ	$q_0$	=	$bQ/k_1M$	
จะได้	$q_0$	=	$3.912 \times (0.396/3600) / (13.244 \times 0.25)$	
		=	$1.29 \times 10^{-1}$	กก./กก.

คำนวณปริมาณบ็อกไซต์ (M) จากสมการ Kinetic approach เพื่อกำจัดฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มก./ล.ที่อัตราการไหล 30 ลิตร/วัน ให้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำออกไม่เกิน 1 มก./ล. หากต้องการผลิตน้ำบริโภคต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลา 7 วัน/รอบการทำงาน

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรที่จุด Breakthrough (V)} &= 7 \text{ (วัน)} \times 30 \text{ (ลิตร/วัน)} \\ &= 210 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ Kinetic approach คำนวณปริมาณบ็อกไซต์ที่ใช้ (M) คำนวณจากสมการ

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1 q_0 M}{Q} - \frac{k_1 C_0 V}{Q}$$

$$\ln\left(\frac{0.005}{0.001} - 1\right) = \frac{13.244 \times 1.29 \times 10^{-4} M}{0.396 \div 3600} - \frac{13.244 \times 0.005 \times 10^{-3} \times 210}{0.396 \div 3600}$$

$$\text{จะได้ } M = 8.2 \text{ กก.}$$

ทำนองเดียวกันหากต้องการกำจัดฟลูออไรด์เป็นระยะเวลาต่อเนื่องกันนาน 1 เดือน ซึ่งมีค่าปริมาตรที่จุด Breakthrough (V) เท่ากับ 900 ลิตร/รอบการทำงาน ก็สามารถคำนวณปริมาณบ็อกไซต์ได้ทำนองเดียวกัน ซึ่งได้เท่ากับ 35.0 กก.

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์ในในคอลัมน์ดูดซับแบบชั้นตรึง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์ และเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบกำจัดฟลูออไรด์สำหรับบ้านเรือนขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 บ็อกไซต์มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้

5.1.2 การฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายด่าง และการกระตุ้นสภาพผิวด้วยสารละลายกรด ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น

5.1.3 การกำจัดฟลูออไรด์ในบ้านเรือนขนาดเล็กที่มีผู้อยู่อาศัย 4 คน/หลังคาเรือน ต้องใช้ปริมาณบ็อกไซต์ 8.2 กิโลกรัม และ 35.0 กิโลกรัม เพื่อกำจัดฟลูออไรด์อย่างต่อเนื่องระยะเวลา 1 สัปดาห์และ 1 เดือน ตามลำดับ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 น้ำที่ผ่านการดูดซับด้วยบ็อกไซต์อาจมีสีขุ่นแฉง จึงควรนำบ็อกไซต์ไปล้างให้สะอาดก่อนที่จะนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับ

5.2.2 ควรทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีอื่นๆ ของน้ำที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยบ็อกไซต์ ว่ามีอันตรายหรือผลเสียต่อการบริโภคหรือไม่

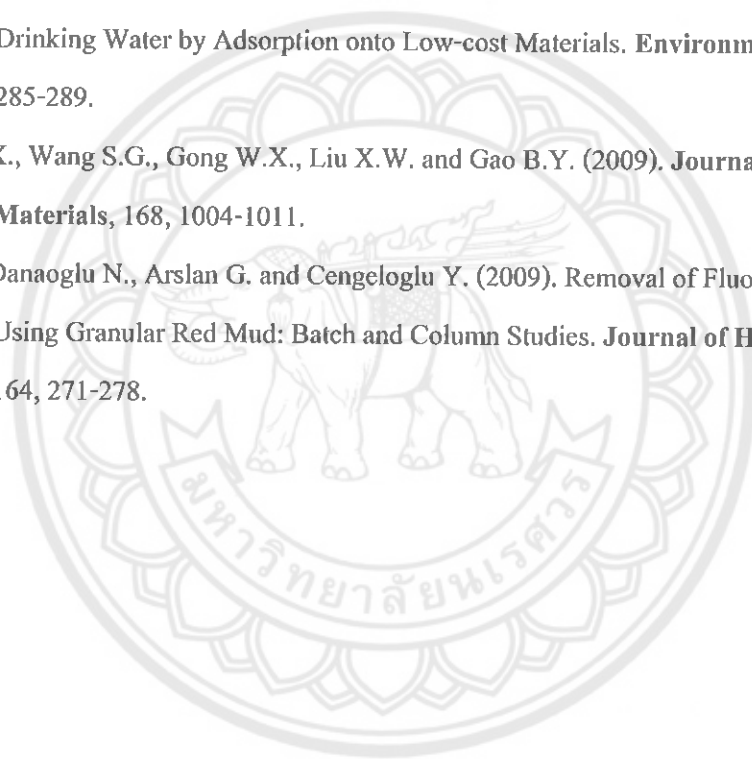
5.2.3 ควรทำการศึกษาถึงจำนวนครั้งสูงสุดที่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ เพื่อประหยัดปริมาณบ็อกไซต์ที่ต้องใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์

5.2.4 ควรศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ, pH ของสารละลาย, และขนาดของวัสดุดูดซับ เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (ม.ป.ป.). บอกไซต์ (Bauxite). สืบค้นเมื่อ 8 ตุลาคม 2553, จาก <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=bauxite>
- กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2545). ปัญหาและการแก้ไขปัญหาการได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป. เชียงใหม่: เชียงใหม่บีเอส การพิมพ์.
- กลุ่มงานทันตสาธารณสุขชุมชน กองทันตสาธารณสุข กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2541). การใช้ฟลูออไรด์ระดับชุมชน. กรุงเทพฯ: องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
- กฤษภัทร ยินทรีย์. (2541). ประสิทธิภาพของถ่านกระตุ้นในการลดปริมาณฟลูออไรด์. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ฉัตรภัทร คงปิ่น. (2551). การศึกษาภาวะโรคและผลกระทบต่อสุขภาพจากฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค ต.แม่ปูกา ต.บวกล้าง อ.สันกำแพง จ.เชียงใหม่. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- มรรยาท เพ็ชรตรา. (2546). การลดฟลูออไรด์ในน้ำประปาบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ ส.ม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.
- สันสนธิ รัชชกุล. (ผู้บรรยาย). สถานการณ์ฟลูออไรด์ในน้ำของประเทศไทย. กลุ่มพัฒนาความร่วมมือทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กระทรวงสาธารณสุข.
- สันสนธิ รัชชกุล, วุฒิชัย ชุมพลกุล และ สุพจน์ ชำนาญไพโร. (2552). แผนที่ฟลูออไรด์. กลุ่มพัฒนาความร่วมมือทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- ศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ. (2539). ฟลูออไรด์กับทันตสุขภาพ. เชียงใหม่: วัลย์รัตน์การพิมพ์.
- สุพจน์ ชำนาญไพโร. (4 กรกฎาคม 2550). รดหน่วยบริการข้อมูลฟลูออไรด์สำหรับชุมชน. สืบค้นเมื่อ 22 กันยายน 2553, จาก [http://icoh.anamai.moph.go.th/thai/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118&catid=61&Itemid=124](http://icoh.anamai.moph.go.th/thai/index.php?option=com_content&view=article&id=118&catid=61&Itemid=124)
- Das N., Pattanaik P. and Das R. (2005). Defluoridation of Drinking Water Using Activated Titanium Rich Bauxite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 292, 1-10.
- Liu W., Yang J. and Xiao B. (2009). Review on Treatment and Utilization of Bauxite Residues in China. *International Journal of Mineral Processing*, 93, 220-231.
- Metcalf and Eddy, Inc. (2003). *Waste Water Engineering: Treatment and Reuse*. 4<sup>th</sup> ed. McGraw Hill.
- Mohapatra M., Anand S., Giles D.E. and Singh P. (2009). Review of Fluoride Removal from Drinking Water. *Journal of Environmental Management*, 91, 67-77.

- Meenakshi and Maheswari R.C. (2006). Fluoride in Drinking Water and Its Removal. **Journal of Hazardous Materials**, B137, 456-463.
- Mohan S.V., Ramanaiah S.V., Rajkumar B. and Sarma P.N. (2007). Removal of Fluoride from Aqueous Phase by Biosorption onto Algal Biosorbent *Spirogyra* sp.-IO2: Sorption Mechanism Elucidation. **Journal of Hazardous Materials**, 141, 465-474.
- Nigamananda Das, Pragyana Pattanaik and Rita Das. (2005). Defluoridation of drinking water using activated titanium rich bauxite. **Journal of Colloid and Interface Science**, 292, 1–10.
- Srimurali M., Pragathi A. and Karthikeyan J. (1998). A Study on Removal of Fluoride from Drinking Water by Adsorption onto Low-cost Materials. **Environmental Pollution**, 99, 285-289.
- Teng S.X., Wang S.G., Gong W.X., Liu X.W. and Gao B.Y. (2009). **Journal of Hazardous Materials**, 168, 1004-1011.
- Tor A., Danaoglu N., Arslan G. and Cengeloglu Y. (2009). Removal of Fluoride from Water by Using Granular Red Mud: Batch and Column Studies. **Journal of Hazardous Materials**, 164, 271-278.

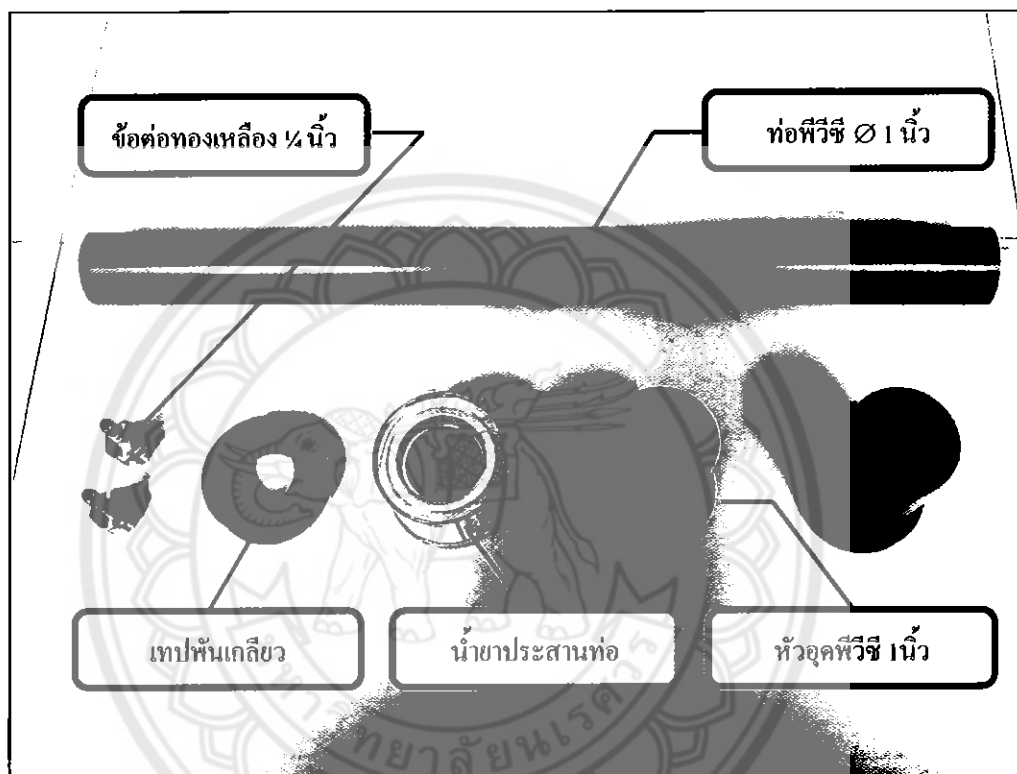




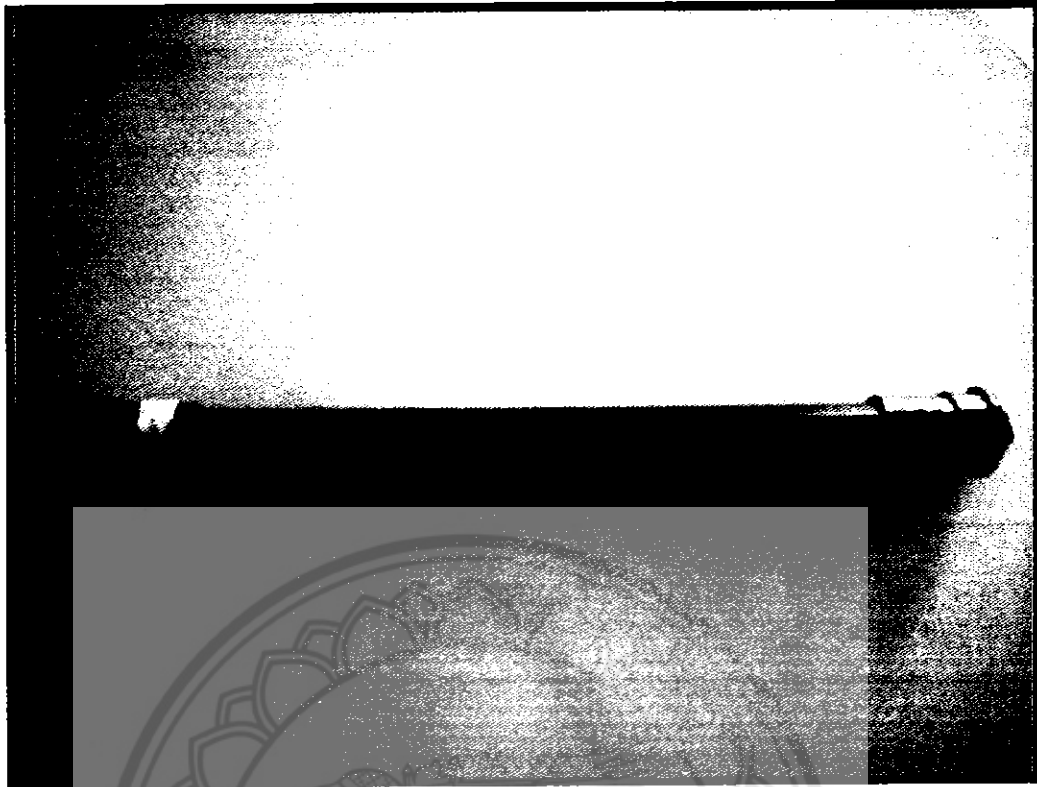


## ภาคผนวก ก

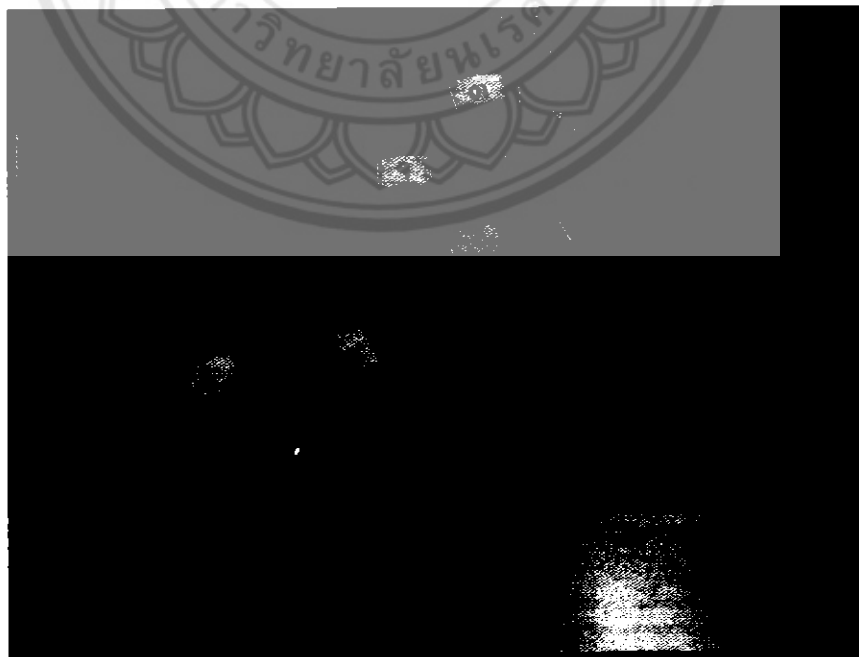
## วัสดุและอุปกรณ์



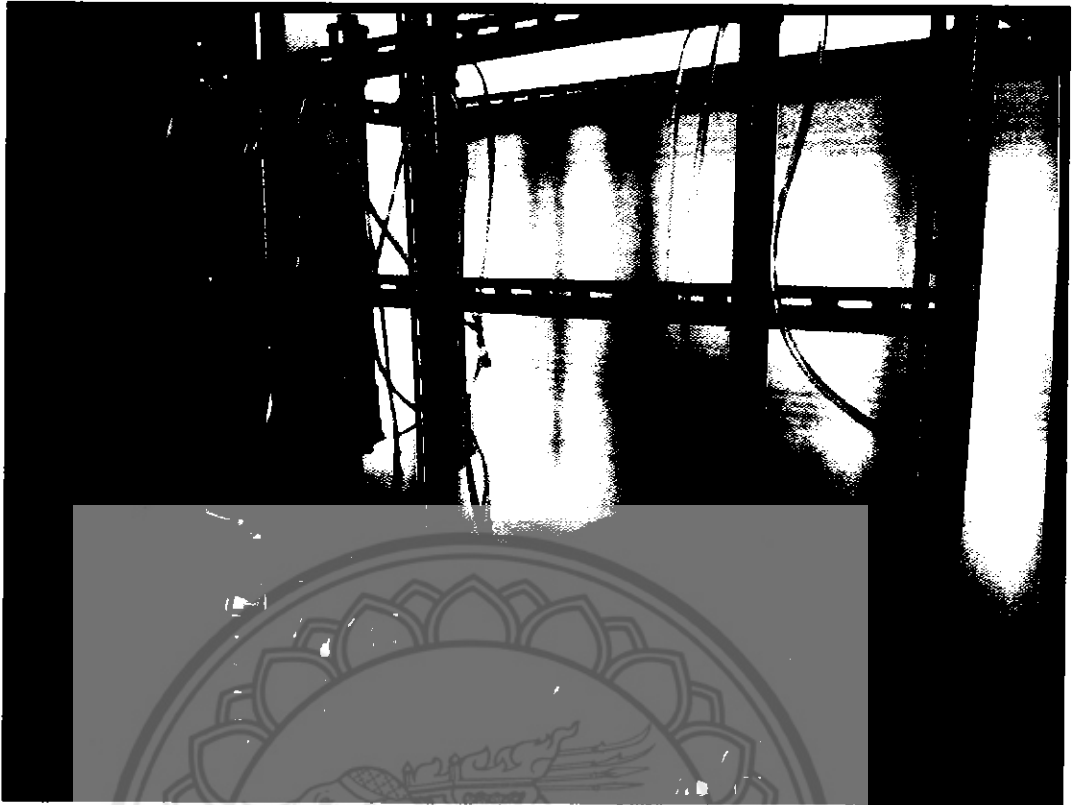
รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์กอลดัมน์ดูดขับ



รูปที่ ก.2 คอถัมน์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.3 หลอดสำหรับใส่เครื่องหมุนเหวี่ยงสาร



รูปที่ ก.4 การทดลองด้วยคอลัมน์





ภาคผนวก ข

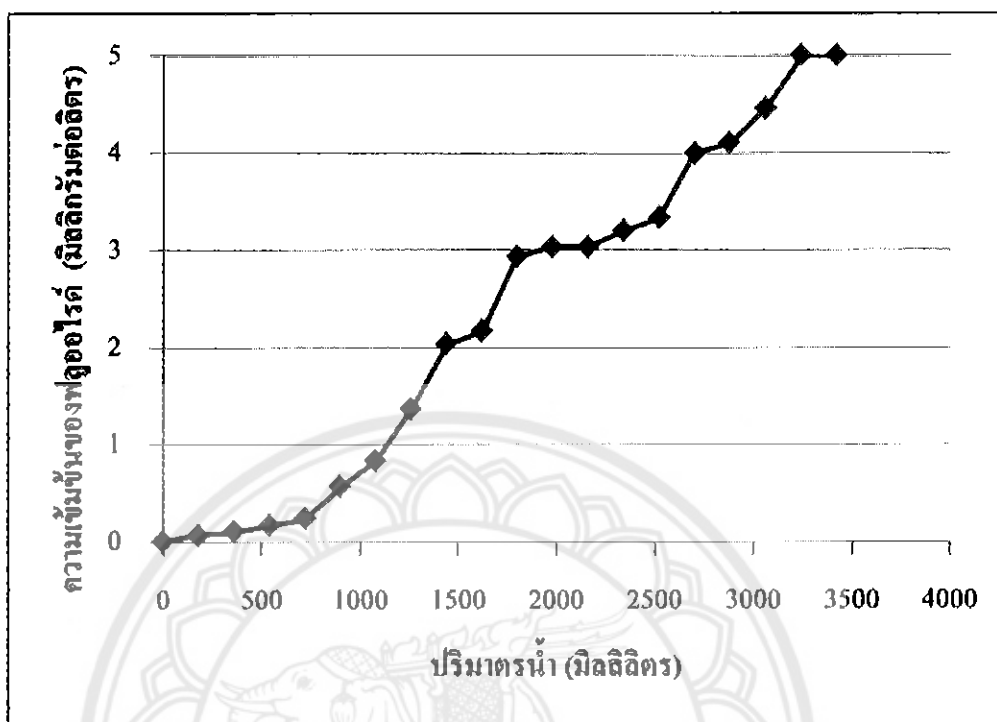
ข้อมูลการทดลองการกำจัดฟลูออไรด์

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลการทดลองการกำจัดฟลูออไรด์

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบ 1BV/hr.

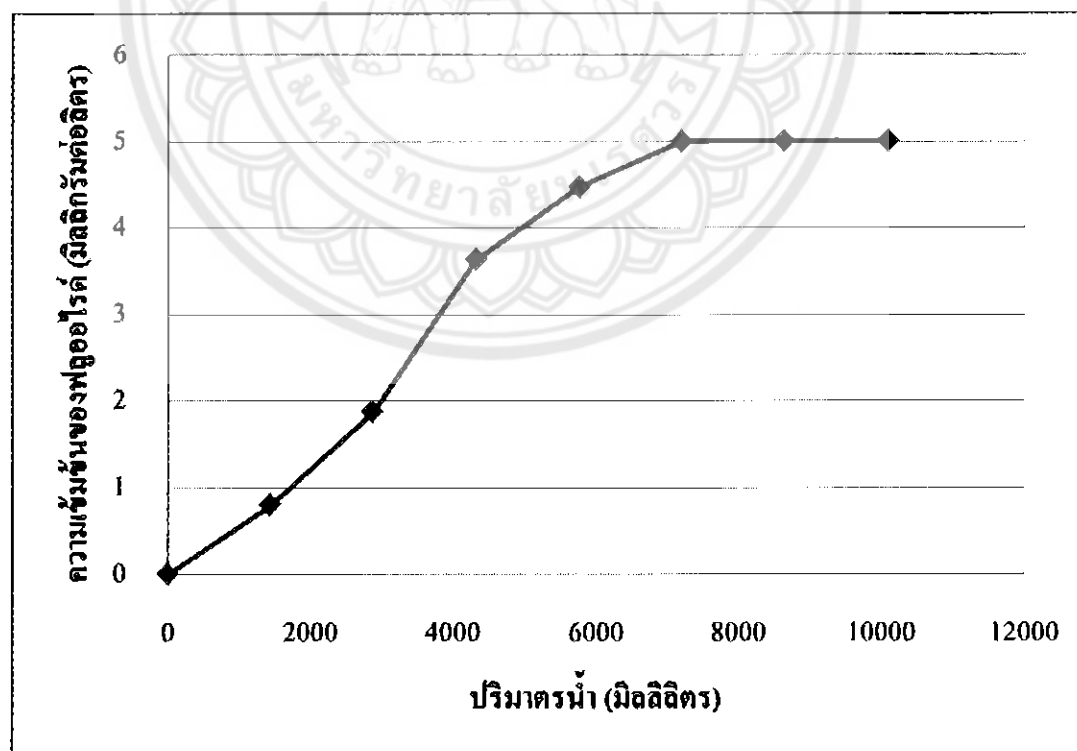
ชั่วโมง	ปริมาณน้ำ (ml)	ค่าดูดกลืนแสง	ฟลูออไรด์ (mg/L)
0	0	0	0
1	180	0.350	0.067
2	360	0.349	0.100
3	540	0.347	0.167
4	720	0.345	0.233
5	900	0.335	0.567
6	1080	0.327	0.833
7	1260	0.311	1.367
8	1440	0.291	2.033
9	1620	0.287	2.167
10	1800	0.264	2.933
11	1980	0.261	3.033
12	2160	0.261	3.033
13	2340	0.256	3.200
14	2520	0.252	3.333
15	2700	0.232	4.000
16	2880	0.229	4.100
17	3060	0.218	4.467
18	3240	0.202	5.000
19	3420	0.202	5.000



รูปที่ ข.1 กราฟผลการทดสอบการดูดซับที่อัตราการไหล 1 BV/hr.

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบ 1BV/hr.(พื้นสภาพ)

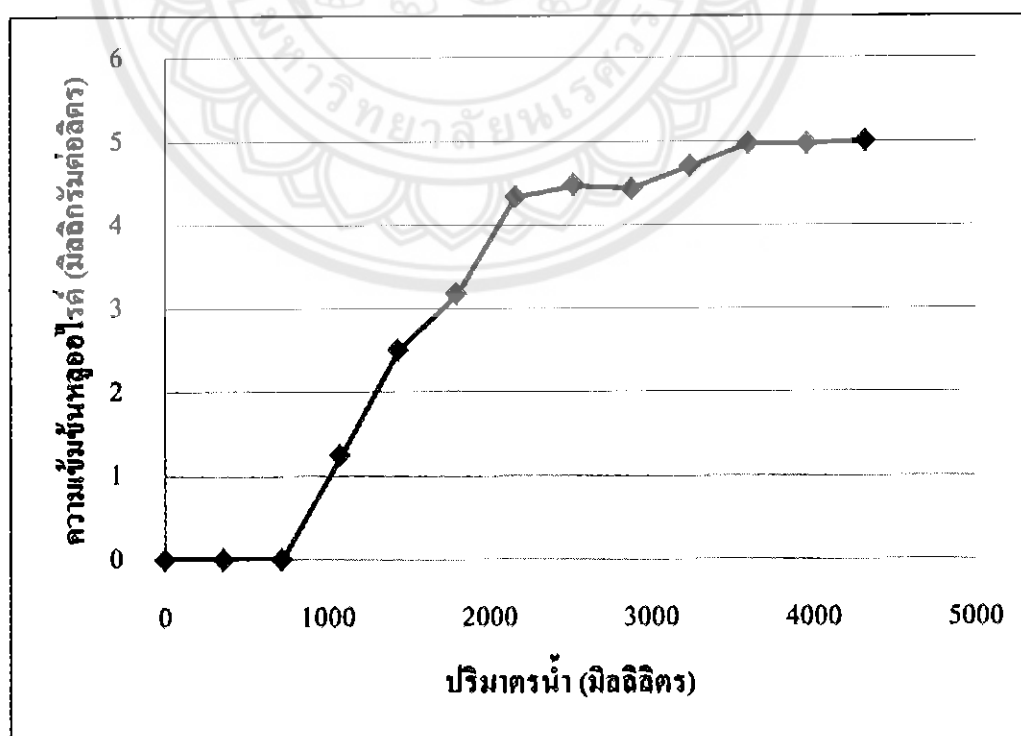
ชั่วโมง	ปริมาณน้ำ	ค่าดูดกลืน	ค่าฟลูออไรด์
0	0	0	0
4	1440	0.328	0.8
8	2880	0.296	1.867
12	4320	0.243	3.633
16	5760	0.218	4.467
20	7200	0.202	5.000
24	8640	0.202	5.000
28	10080	0.202	5.000



รูปที่ ข.2 กราฟผลการทดสอบการดูดซับอัตราการใช้ 1 BV/hr. (พื้นสภาพ)

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบ 2BV/hr.

ชั่วโมง	ปริมาณน้ำ	ค่าดูดกลืน	ค่าฟลูออไรด์
0	0	0	0
1	360	0.352	0.0
2	720	0.352	0.000
3	1080	0.315	1.233
4	1440	0.277	2.500
5	1800	0.257	3.167
6	2160	0.222	4.333
7	2520	0.218	4.467
8	2880	0.219	4.433
9	3240	0.211	4.700
10	3600	0.203	4.967
11	3960	0.203	4.967
12	4320	0.202	5.000

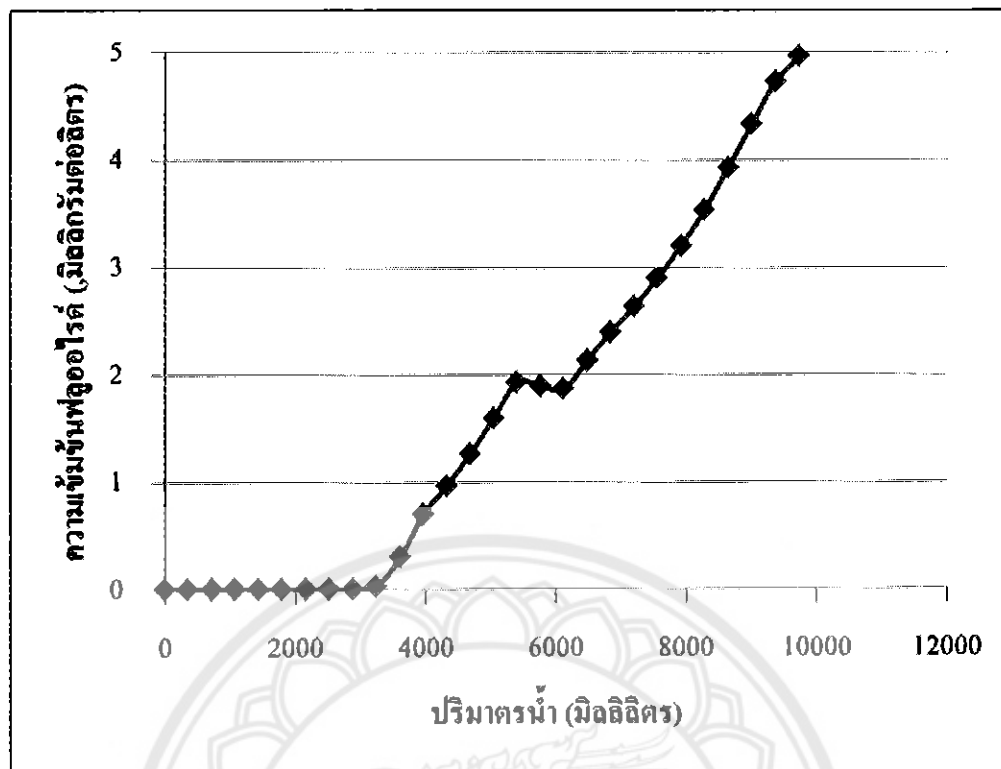


รูปที่ ข.3 กราฟผลการทดสอบการดูดซับอัตราการไหล 2 BV/hr.



ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบ 2BV/hr.(พื้นสภาพ)

ชั่วโมง	ปริมาณน้ำ	ค่าดูคกิ้น	ค่าฟลูออไรด์
0	0	0	0
1	360	0.352	0.0
2	720	0.352	0.000
3	1080	0.352	0.000
4	1440	0.352	0.000
5	1800	0.352	0.000
6	2160	0.352	0.000
7	2520	0.352	0.000
8	2880	0.352	0.000
9	3240	0.351	0.033
10	3600	0.343	0.300
11	3960	0.331	0.700
12	4320	0.323	0.967
13	4680	0.314	1.267
14	5040	0.304	1.600
15	5400	0.294	1.933
16	5760	0.295	1.900
17	6120	0.296	1.867
18	6480	0.288	2.133
19	6840	0.280	2.400
20	7200	0.273	2.633
21	7560	0.265	2.900
22	7920	0.256	3.200
23	8280	0.246	3.533
24	8640	0.234	3.933
25	9000	0.222	4.333
26	9360	0.210	4.733
27	9720	0.203	4.967
28	10080	0.200	5.000



รูปที่ ข.4 กราฟผลการทดสอบการดูดซับอัตราการใช้ 2 BV/hr. (พื้นสภาพ)

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายภัทรวุฒิ พงศ์วุฒิสักดิ์  
 ภูมิลำเนา 15/6 หมู่ 10 ต. วังแดง อ. ตรอน จ. อุตรดิตถ์  
 ประวัติการศึกษา  
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุตรดิตถ์  
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: pat\_mankung@hotmail.com



ชื่อ นางสาวศุภานิช ชารี  
 ภูมิลำเนา 126 หมู่ 8 ต. หนองยาง อ. หนองยาง  
 จ. อุทัยธานี  
 ประวัติการศึกษา  
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองฉาง  
 วิทยา  
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: takky\_winter@hotmail.com