



การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม
ในการทดสอบดูดซับแบบที่ละเท

FLUORIDE REMOVAL BY BAUXITE AND ALUM WASTE IN BATCH
ADSORPTION TEST

นายคมสันต์ ต้นหลง รหัส 51381405
นายจักรพงษ์ สุจาคำ รหัส 51384130

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554

ชื่อและนามสกุล	วิศวกรรมศาสตร
ชั้นปี	23 พ.ศ. 2555
เลขประจำตัว	16048419
ชื่อและนามสกุล	พ.ร.
ชื่อและนามสกุล	อ.วิศ. ๑152

๑152 ๑
2554



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มในการทดสอบดูชั้นแบบทีละเท		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายคมสันต์	ตันหลง	รหัส 51381405
	นายจักรพงษ์	สุจำคำ	รหัส 51384130
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชัยวัฒน์ โพร้ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2554		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

Ba Was
.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ชัยวัฒน์ โพร้ทอง)

จ.ล.
.....กรรมการ
(อาจารย์อำพล เตโชวาณิชย์)

ว.ล.
.....กรรมการ
(อาจารย์วรงค์ศักดิ์ ช่อนกลิ่น)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มในการทดสอบดูดซับแบบทีละเท		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายคมสันต์ คันทอง	รหัส	51381405
	นายจักรพงษ์ สุจาคำ	รหัส	51384130
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชัชวรินทร์ โพธิ์ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม ในการทดสอบการดูดซับแบบทีละเท ศึกษาผลของเวลาสัมผัส พีเอช และขนาดต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ บ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มที่ใช้ได้จากบริษัทท่าไทย จำกัด จากการศึกษา พบว่า ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มมีค่าเป็น 24 ชั่วโมง จากการทดสอบไอโซเทอรัม พบว่า บ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มสอดคล้องกับไอโซเทอรัมของ Langmuir จากการศึกษาผลของพีเอช พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์จะมีค่าสูงในสารละลายที่มีพีเอชต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า บ็อกไซต์ที่มีขนาดเล็กทำให้การดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้น

Project title Fluoride Removal by Bauxite and Alum Waste in Batch Adsorption Test

Name Mr. Komsan Tunhlong ID. 51381405
Mr. Jakrapong Sujakam ID. 51384130

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 and alum waste in batch adsorption test and study the influence of contact time, pH and grain size on the fluoride removal efficiency. The bauxite and alum waste obtained from Thathai company limited. The study shows that the equilibrium time of bauxite and alum waste were 24 hr. The isotherm test found that bauxite and alum waste were corresponding with Langmuir isotherm. The lower pH of solution resulted in improved fluoride removal efficiency of both adsorbents. It was also found that the smaller size of bauxite resulted in improved fluoride removal efficiency.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างค้ำจุนของ อาจารย์ชัชวัฒน์ โพร้ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและผู้มีพระคุณซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



คณะผู้ดำเนิน โครงการงานวิศวกรรม

นายคมสันต์ ต้นหลง

นายจักรพงษ์ สุจาคำ

มีนาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ฟลูออไรด์.....	4
2.2 สถานการณ์ฟลูออไรด์ในไทย.....	8
2.3 การกำจัดฟลูออไรด์.....	12
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).....	16
2.5 บ็อกไซต์ (Bauxite).....	21
2.6 กากของเสียจากการผลิตสารส้ม (Alum Waste)	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	31
3.1 การวิเคราะห์ฟลูออไรด์.....	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	35
3.3 การเตรียมวัสดุชุดขับ.....	36
3.4 การเตรียมสารละลายฟลูออไรด์.....	37
3.5 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	37
3.6 การศึกษาหาไอโซเทิร์มของวัสดุชุดขับ.....	38
3.7 การศึกษาของขนาดของวัสดุชุดขับต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	38
3.8 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับฟลูออไรด์.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	40
4.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	40
4.2 ผลการทดลองการศึกษาหาไอโซเทิร์มของวัสดุชุดขับ.....	42
4.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	46
4.4 ผลการทดลองการศึกษาผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	47
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 บทสรุป.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	52
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	54
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.2 งบประมาณตลอดโครงการ.....	3
2.1 ปริมาณฟลูออไรด์ในอาหารและเครื่องดื่ม.....	5
2.2 ค่ามาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค.....	8
2.3 ระดับฟลูออไรด์สูงสุดในน้ำบาดาล.....	10
2.4 ผลของการบำบัดด้วยความร้อนต่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ.....	21
2.5 องค์ประกอบทางเคมีและธรณีวิทยาของบ็อกไซต์.....	23
2.6 องค์ประกอบของกากของเสียจากระบวนการผลิตสารส้มจากคลาโอลิน.....	27
4.1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	41
4.2 ผลการวิเคราะห์ Isotherm ของบ็อกไซต์.....	43
4.3 ผลการวิเคราะห์ Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	45
4.4 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	46
ก.1 ผลการวิเคราะห์กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ฟลูออไรด์.....	53
ข.1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์.....	55
ข.2 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	56
ข.3 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มของบ็อกไซต์.....	57
ข.4 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	58
ข.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	59
ข.6 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	60
ข.7 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	61

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
ข.8 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	62
ข.9 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	63
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพของฟลูออไรด์.....	6
2.2 แผนที่แสดงแหล่งน้ำบาดาลที่ไม่ปลอดภัยของประเทศ.....	11
2.3 แผนภาพการไหลของออสโมซิส.....	13
2.4 Elctrodialysis Stack.....	14
2.5 เครื่องกรองถ่านกระดูกในครัวเรือน.....	16
2.6 ลักษณะการดูดซับสารอินทรีย์ของ Activated carbon.....	17
2.7 บ็อกไซต์และภาพถ่าย SEM ของบ็อกไซต์.....	22
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	36
3.3 วัสดุดูดซับ.....	36
4.1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์.....	42
4.2 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	42
4.3 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของบ็อกไซต์.....	43
4.4 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของบ็อกไซต์.....	44
4.5 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	45
4.6 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	45
4.7 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	46
4.8 ผลวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	47
4.9 ผลวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	48
ก.1 ผลการวิเคราะห์กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์.....	53
ข.1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์.....	55
ข.2 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	56
ข.3 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของบ็อกไซต์.....	57
ข.4 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของบ็อกไซต์.....	58

สารบัญญรูป (ต่อ)

ข.5 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	59
ข.6 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	60
ข.7 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	61
ข.8 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์.....	62
ข.9 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม.....	63
ค.1 การเตรียมวัสดุดูดซับและการทดสอบ.....	65



สารบัญญัติลักษณะและอักษรย่อ

pH	=	Power of hydrogen ion concentration
SPADNS	=	[Sodium 2 -- (Parasulfophenylazo)-1,8-Dihydroxy -3,6-Naphthalenedisulfonate
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
C_0	=	ความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้น
C_c	=	ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เวลาสมดุล
M	=	มวลของวัสดุดูดซับ
N	=	Normality
a	=	ค่าคงที่ของไอโซเทอมของ Langmuir
b	=	ค่าคงที่ของไอโซเทอมของ Langmuir



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) และการผิดปกติของกระดูก (Skeleton Fluorosis) (ศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ, 2539) หากในน้ำมีปริมาณฟลูออไรด์มากเกินไปก็สามารถกำจัดได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ ซึ่งอาศัยหลักการกรองผ่านเยื่อกรอง จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพงไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ในชนบทที่ห่างไกล ขณะที่กระบวนการดูดซับ (Adsorption) โดยอาศัยวัสดุดูดซับ เช่น อะลูมินาแกมมันต์ ถ่านกระดูก หรือ ซีโอไลต์ รวมทั้งวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกอื่นๆ ก็สามารถกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำได้เช่นกัน นับเป็นทางเลือกที่ดีและประหยัดอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ

บ็อกไซต์ (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) ซึ่งมีออกไซด์ของอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเช่นเดียวกับอะลูมินาแกมมันต์ ซึ่งมีจำหน่ายในท้องตลาดและนิยมใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ในปัจจุบัน ส่วนของเสียจากการผลิตสารส้มก็เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่เกิดจากระบวนการผลิตสารส้มด้วยบ็อกไซต์ ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ จึงเป็นที่มาของการวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาแนวทางในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการดูดซับด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบชุดกำจัดฟลูออไรด์ขนาดเล็กต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม
- 1.2.4 เพื่อศึกษาปัจจัยและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับได้แก่ เวลา พีเอช และขนาดของวัสดุดูดซับ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ทราบประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม
- 1.3.2 สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับน้ำธรรมชาติ
- 1.3.3 สามารถนำไปศึกษาต่อและนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการกำจัดฟลูออไรด์ได้
- 1.3.4 เพื่อเป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบชุดกำจัดฟลูออไรด์ขนาดเล็ก

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม
- 1.4.2 ศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัม/ลิตร
- 1.4.3 ศึกษาผลของเวลาสัมผัส ไอโซเทิร์มของการดูดซับ พีเอช และขนาดของวัสดุดูดซับต่อการกำจัดฟลูออไรด์
- 1.4.4 ทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวิธีแบบทีละเท

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษากำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มด้วยกระบวนการดูดซับในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้มในการทดสอบแบบทีละเท ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบหาเวลาสัมผัส ทดสอบหาไอโซเทิร์มของการดูดซับ ทดสอบหาผลของขนาดต่อการดูดซับ และทดสอบหา pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ 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.
ศึกษาและเตรียมวัสดุคูดซ์						
ทดสอบการคูดซ์แบบทีละเท						
สรุปผลการศึกษา						
จัดทำรูปเล่ม						



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

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), ฮอร์นเบลล์ (Homblende), และเพ็กมาไตท์ (Pegmatite) เช่น โทปาซ (Topaz), ทอร์มาลีน (Tourmaline) เป็นต้น นอกจากนั้นยังพบในบรรยากาศซึ่งมีที่มาจากฝุ่นละอองในบรรยากาศจากการทำเหมืองและการเผาไหม้ หรือในรูปของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซฟลูออรีน ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ จากอุตสาหกรรมต่างๆ นอกจากนั้นยังพบได้ในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินซึ่งเกิดจากสัมผัสกับหินและแร่ในบริเวณนั้น

น้ำทุกแหล่งน้ำจึงมีฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ลักษณะทางภูมิศาสตร์ เคมิของแหล่งน้ำ 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 ยาเม็ด 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)
Cereals		Nuts and oil seeds	
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	Beverages	
Red gram dal	3.7	Tea	60-112
Soyabean	4.0	Aerated drinks	0.77-1.44
Vegetables		Spices and condiments	
Cabbage	3.3	Coriander	2.3
Tomato	3.4	Garlic	5.0
Cucumber	4.1	Turmeric	3.3
Lady finger	4.0	Food from animal sources	
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	Others	
Fruits		Rock salts	200.0-250.0
Mango	3.7	Areca but (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 โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะทำให้ฟันมีความทนทานต่อการละลายตัวเนื่องจากกรดที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อจุลินทรีย์และน้ำตาลทำให้เกิดฟันผุน้อยลงถ้าดื่มน้ำที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์เหมาะสมประมาณ 1 มก./ล. เป็นประจำในระยะที่ฟันกำลังเจริญเติบโต ฟลูออไรด์จะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของฟัน โดยเปลี่ยนผลึกองค์ประกอบหลักของเคลือบฟัน Hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) ไปเป็น Fluorapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$) ซึ่งเสถียรกว่าและถูกกัดกร่อนด้วยกรดแลกติกได้น้อยกว่า ทำให้ฟันผุได้ยากขึ้น ฟลูออไรด์จะเข้าร่วมกับสารประกอบของฟันได้ 2 ระยะ คือ (มารยาท, 2546)

เมื่อร่างกายได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป ทั้งจากทางน้ำ อาหาร อากาศ ยาสีฟัน ฯลฯ จนเกินขอบเขตที่ร่างกายสามารถรับได้อย่างปลอดภัย ทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายได้หลายทาง ได้แก่ การเกิดผลต่อฟัน ทำให้เกิดฟันตกกระ เกิดผลต่อกระดูก ทำให้กระดูกหนา เปราะ หักง่าย

ตลอดจนการเกิดขาโก่ง กระดูกผิดรูปร่างจากฟลูออไรด์เกาะบนกระดูก ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีผลต่อระบบร่างกายอื่นที่ไม่ใช่ระบบ โครงสร้าง เช่น ระบบต่อมไร้ท่อ ระบบสืบพันธุ์ กล้ามเนื้อ และ เม็ดโลหิต นอกจากนี้ยังพบว่าในพื้นที่ที่ประชากรได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป เด็กๆ จะมีระดับของ ไอคิว โดยเฉลี่ยต่ำกว่าชุมชนที่มีฟลูออไรด์ต่ำ



(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. สำหรับเด็กมีรายงานว่า 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 คือช่วงเวลาตั้งแต่แรกเกิดจนถึงอายุประมาณ 12 ปี จะมีความความผิดปกติเกิดขึ้น ความผิดปกติที่เห็นได้เป็นอย่างแรก ได้แก่การเกิดความผิดปกติกับผิวเคลือบฟันของฟันแท้ที่เรียกว่าฟันตกกระ (Dental fluorosis) ฟันตกกระส่วนใหญ่เกิดในฟันแท้ เนื่องจากฟันน้ำนมสร้างขณะอยู่ในครรภ์มารดา และฟลูออไรด์ไม่สามารถซึมผ่านรกไปยังทารกในครรภ์ได้ ฟันตกกระ ไม่ใช่โรค แต่เป็นสภาวะการเจริญพร่องของเคลือบฟัน ซึ่งเกิดจากการได้รับ ฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปปริมาณที่เหมาะสม แล้วไปรบกวนกระบวนการสร้างแร่ธาตุที่เคลือบฟันในระยะที่มีการสร้างฟันและฟันเจริญเติบโตอยู่ในกระดูกขากรรไกร ทำให้เคลือบฟันมีสีขาวขุ่นบางส่วนหรือทั้งซี่ ตามระดับความรุนแรงของสภาวะฟันตกกระ ความรุนแรงจะขึ้นกับปริมาณของฟลูออไรด์ที่ได้รับ ซึ่งมีได้ตั้งแต่แทบจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ หรือพบผิดปกติเล็กน้อย เป็นจุดขาวประปราย มีเส้นขาวบาง ๆ หรือเป็นหย่อมขาว ๆ ใกล้เคียง ปลายหน้าตัดของฟันหน้า หรือยอดแหลมของฟันหลังเหมือนหิมะปกคลุมยอดเขาที่ค่อย ๆ บางลง กลืนไปกับเคลือบฟันรอบ ๆ หรือผิดปกติรุนแรง ที่มีหลุมตามขวางเคลือบฟันเป็นสีน้ำตาล มักเห็นชัดเจนในฟันหน้าและฟันกรามน้อย บางครั้งเคลือบฟันที่ตกกระ แดงออกจนเห็นสีเหลืองของเนื้อฟัน สภาวะฟันตกกระ มักเกิดกับฟันซี่เดียวกันทั้งสองฟากของใบหน้าเพราะมีการสร้างและเจริญเติบโตในระยะเดียวกัน พบมากในฟันกรามน้อย และฟันกรามซี่ที่ 2 รองลงมาคือฟันตัดหน้าบน ส่วนฟันตัดหน้าล่าง มีโอกาสเกิดน้อยที่สุด สภาวะฟันตกกระนี้เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างถาวร เมื่อเกิดขึ้นแล้วไม่มีทางกลับคืนสู่สภาพปกติได้

ผลกระทบต่อกระดูก ในผู้ที่ดื่มน้ำที่มีฟลูออไรด์สูงมากติดต่อกันเป็นเวลาตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไปไม่ว่าในช่วงใดของอายุ จะเกิดความผิดปกติของกระดูกเกิดขึ้น พิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกนี้อาจเกิดมากน้อยได้ตั้งแต่ไม่มีอาการภายนอกใดๆ นอกจากอาการปวดตามข้อเล็กๆ เช่น มือ เท้า เข้าไปจนถึงปวดหลัง แต่จะพบความผิดปกติได้จากภาพถ่ายทางรังสี ที่กระดูกมีความทึบแสงและหนากว่าปกติไปจนถึงผู้ที่เป็นมากจนพบว่าการจับตัวของ แคลเซียมตามเส้นเอ็น และข้อต่อเกิดกระดูกงอก และกระดูกเชื่อมติดกันข้อข้อต่อต่างๆจนทำให้เป็นปัญหาในการเคลื่อนไหว ที่เรียกกันว่า Crippling skeletal fluorosis ถ้าเอากระดูกของคนที่มีสภาวะฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูกมาดูจะเห็นว่ากระดูกเหล่านี้จะหนัก มีสีขุ่น ไม่เรียบมีกระดูกงอกขรุขระซึ่งความขรุขระของกระดูกเหล่านี้ช่วยในการวินิจฉัยแยกสภาวะฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูก ออกจากสาเหตุอื่นๆที่ทำให้เกิดกระดูกหนาทึบได้ เนื่องจากการเกิดพิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกในระยะแรกๆ จะมีอาการเพียงการปวดตามข้อไปจนถึงปวดหลัง การวินิจฉัยทำได้ยาก การรักษาจึงมักเป็นการให้ยาแก้ปวด จากรายงานในประเทศไทย พบว่าในบริเวณที่มีฟลูออไรด์สูงจะมีอัตราการให้ยาแก้ปวดสูงกว่าในพื้นที่อื่นๆ ทำให้เกิดอันตรายจากผลข้างเคียงของการใช้ยาแก้ปวดสูงตามไปด้วย (คันสณี และคณะ, 2552)

2.1.3 มาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม

ค่าความเข้มข้นมาตรฐานของฟลูออไรด์ในน้ำดื่มของการประปานครหลวงกำหนดไว้ 0.7-1.0 มก./ล. ขณะที่มาตรฐานน้ำบริโภครวม 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.)	
	เกณฑ์กำหนด	เกณฑ์อนุโลม
	สูงสุด	สูงสุด
มาตรฐานน้ำดื่มการประปานครหลวง	0.7	1.0
มาตรฐานน้ำบริโภคประเภทที่ 1 มอก. 257/2549	0.7	-
มาตรฐานน้ำบริโภคประเภทที่ 2 มอก. 257/2549	0.7	1.0
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	0.7	1.0
คำแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปี 2549	1.5	

2.2 สถานการณ์ฟลูออไรด์ในไทย

ประเทศไทยในประเทศไทยมีประชาชนในหลายพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดสภาวะฟันตกกระ เนื่องจากการได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากเกินไป ปัญหาฟลูออไรด์ในน้ำบริโภคสูง มีผลกระทบต่อฟันและสุขภาพโดยทั่วไปของประชาชน พบมากในพื้นที่เขตภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย เป็นปัญหาที่เรื้อรังมาเป็นเวลานาน จากการได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไป และติดต่อกันเป็นเวลานาน โดยเฉพาะการบริโภคน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูงเกินมาตรฐาน (มาตรฐานปริมาณฟลูออไรด์ในระดับที่ปลอดภัยของประเทศไทยหรือประเทศในเขตร้อน คือ ไม่เกิน 0.70 มก./ล.) ส่งผลให้เกิดฟันตกกระในฟันแท้ที่มีลักษณะขาวขุ่นบางส่วนหรือทั้งซี่ไปจนถึงเป็นสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆ 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 มาตามแนวใต้ผิวดิน ทำให้มีการปนเปื้อนของสารฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำบริโภคทั้งแหล่งน้ำ ใต้ดินและน้ำผิวดินหลายบริเวณ โดยเฉพาะในน้ำบาดาล ประชาชนจึงได้รับสารฟลูออไรด์เข้าสู่ ร่างกายใน ระดับสูงกว่ามาตรฐานถึงขั้นที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ แม้ในน้ำดื่มบรรจุขวดก็พบว่ามี ฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง (จุมพล, 2540)

รายงานผลการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ของผ่านทันตสาธารณสุข สำนักงานสาธารณสุข จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2527 จากการเก็บตัวอย่างน้ำจาก 1,084 บ่อ ทั่วจังหวัดเชียงใหม่ ใน 7 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง, ดอกสะเก็ด, ผาง, จอมทอง, หางดง, คอยเต่า, และสารภี พบว่ามีปริมาณ ฟลูออไรด์ในน้ำบ่อซึ่งประชาชนใช้ในการบริโภคสูงเกินกว่า 1.2 มก./ล. จำนวนกว่าร้อยละ 6.8 และ บ่อที่พบความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่า 3.0 มก./ล. มีจำนวนกว่าร้อยละ 1.0

สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ รถหน่วยบริการข้อมูลฟลูออไรด์สำหรับชุมชน ซึ่งทำการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และแม่ฮ่องสอน พบว่า จังหวัดเชียงใหม่ มีปริมาณฟลูออไรด์ ระหว่าง 0.10-9.57 มก./ล. ร้อยละ 14.9 ซึ่งปริมาณฟลูออไรด์สูงสุด คือ น้ำบ่อ บ้านใหม่หมอกจ้าม ตำบลท่าตอน อำเภอแม่ฮาด ขณะที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน มีปริมาณฟลูออไรด์ ระหว่าง 0.10-27.1 มก./ล. และพบว่าปริมาณฟลูออไรด์สูงเกินมาตรฐาน คือ ร้อยละ 32.0 ซึ่ง ฟลูออไรด์สูงสุด คือ น้ำพุร้อน เมืองแปง บ้านใหม่คอนตัน ตำบลเมืองแปง อำเภอปาย (สุพจน์, 2550)

จากการเก็บตัวอย่างน้ำจากครัวเรือนทั้งหมด 860 ครัวเรือน ทั้งน้ำที่ใช้ทำอาหารและ น้ำที่ใช้ ดื่ม ได้รับตัวอย่างน้ำที่มีผลตกคราบถวนสมบูรณ์ทั้งสิ้น 728 ตัวอย่าง พบว่าน้ำ บริโภคที่ใช้สำหรับดื่ม ส่วนใหญ่ จำนวน 370 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 50.82 มี ฟลูออไรด์เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนที่เหลือจำนวน 358 ตัวอย่าง หรือคิดเป็นร้อยละ 49.18 มีฟลูออไรด์ไม่เกิน มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่น้ำบริโภคที่ใช้สำหรับทำอาหาร ส่วนใหญ่ จำนวน 649 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 89.15 มีฟลูออไรด์เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ ลิตร ส่วนที่เหลืออีกเพียง 79 ตัวอย่าง หรือคิดเป็นร้อยละ 10.85 เท่านั้นที่มีฟลูออไรด์ ไม่เกิน มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร (ฉัตรภัทร์, 2551)

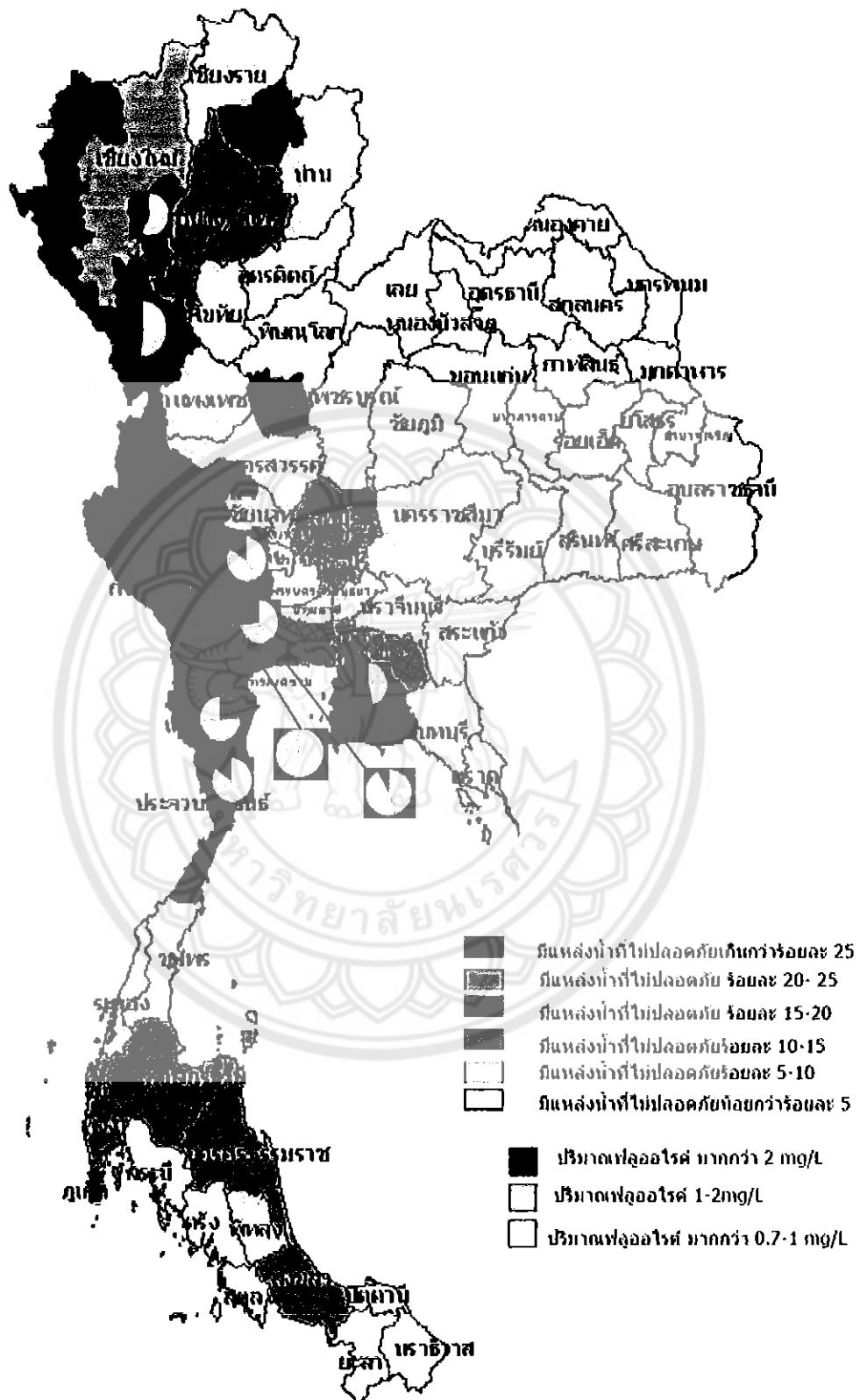
คันสนธิ และคณะ (2552) ทำการรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำบาดาล จำนวน 61343 บ่อ จากข้อมูลของหน่วยงานรัฐที่มีบทบาทหน้าที่ในการตรวจวิเคราะห์น้ำ ได้แก่ กองทันตสาธารณสุข ศูนย์ห้องปฏิบัติการ และศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย และ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.2 นำมา คำนวณหาค่าร้อยละจากจำนวนบ่อทั้งหมดในแต่ละจังหวัด จัดทำเป็นแผนที่สาระสนเทศทาง ภูมิศาสตร์ จำแนกข้อมูลแต่ละจังหวัด โดยใช้ค่าปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำที่สูงกว่า 0.7 มก./ลิตร (ค่า

มาตรฐานของกรมอนามัย) เป็นค่าปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำที่ไม่ปลอดภัย ส่วนค่าปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำที่เกิดกว่า 2 มก./ลิตร เป็นค่าที่จะทำให้เกิดเป็นพิษต่อกระดูก ถ้าดื่มติดต่อกันเป็นเวลานาน ส่วนค่าของปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำระหว่าง 0.3-0.7 เป็นค่าที่บ่งบอกว่าไม่มีความจำเป็นต้องมีการใช้ฟลูออไรด์เสริม เมื่อจำแนกข้อมูลแล้วคำนวณค่าร้อยละ เพื่อสะท้อนภาพความเสี่ยงของพื้นที่

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

ตารางที่ 2.3 ระดับฟลูออไรด์สูงสุดในน้ำบาดาล (กองทันตสาธารณสุข, 2539)

จังหวัด	อำเภอ/กิ่งอำเภอ	ระดับฟลูออไรด์สูงสุด (มก./ล.)
ราชบุรี	อ.สวนผึ้ง	12.30
นครสวรรค์	กิ่ง อ.แม่วังค์	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 (สินสนธิ 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)

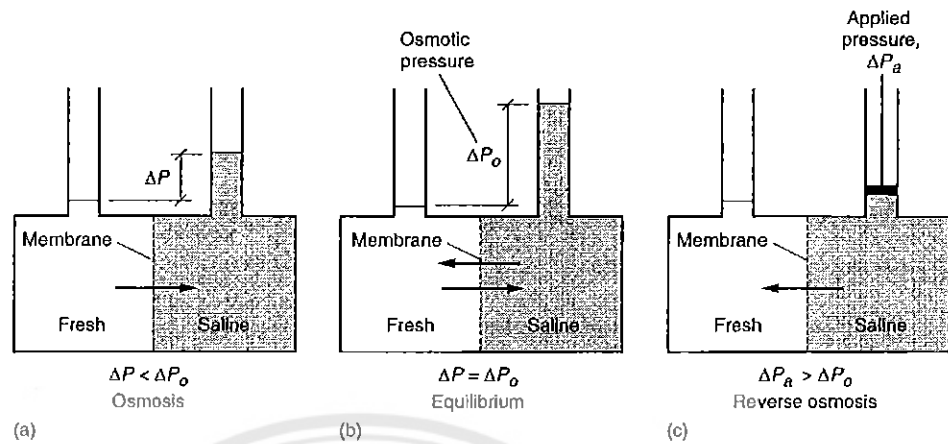
โดยทั่วไปกระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ (1) เมมเบรนที่ขับเคลื่อนด้วยความดัน (Pressure-Driven Membrane) ประกอบด้วย Microfiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) และ Reverse Osmosis (RO) และ (2) เมมเบรนที่ขับเคลื่อนด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electrical Voltage-Driven 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 โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงกว่าไปสู่ด้านที่มีความ

เข้มข้นน้อยกว่า ดังรูป 3(c) เรียกกระบวนการดังกล่าวว่าออสโมซิสแบบย้อนกลับ (Reverse Osmosis)



รูปที่ 2.3 แผนภาพการไหลของออสโมซิส (Metcalf and Eddy, 2003)

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

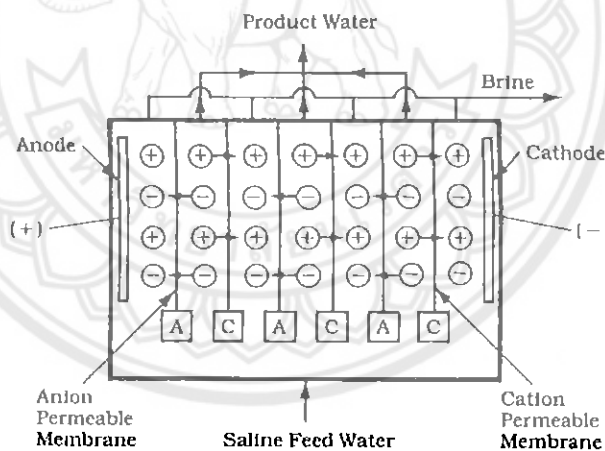
ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับ ชนิดของเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย ลักษณะของอิมอนที่ต้องการแยกออก สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ เช่น พีเอชและอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงมาก อาจจำเป็นต้องมีระบบกำจัดสารแขวนลอยในน้ำออกก่อนป้อนเข้าระบบเพื่อป้องกันการอุดตันของเยื่อเลือกผ่าน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

อย่างไรก็ตาม ระบบเมมเบรนจำเป็นต้องอาศัยพลังที่ต้องใส่เข้าไปในรูปของความดัน เพื่อเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของน้ำให้ไหลผ่านเมมเบรนไปได้ ยิ่งระบบมีที่มีขีดความสามารถในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้ก็จำเป็นต้องอาศัยเมมเบรนที่มีรูขนาดเล็ก และจำเป็นต้องอาศัยความดันที่สูงมาก โดยทั่วไปกระบวนการออสโมซิสแบบย้อนกลับ มักต้องการพลังงานจากเครื่องสูบลำดับสูงน้ำเพื่ออัดความดันให้แก่ระบบ โดยปกติต้องการพลังงานประมาณ 2.4-4.8 กิโลวัตต์.ชม./ลบ.ชม.

กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)

Electrodialysis เป็นกระบวนการเมมเบรนที่อาศัยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและเยื่อเมมเบรนเพื่อแยกไอออนออกจากของเหลว ไอออนบวกและไอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรน ซึ่งถูกวางระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้กับอิเล็กโทรดให้เกิดการไหลของกระแสตรง ส่งผลให้ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ (Cathode) และไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก (Anode) การจัดเรียงเมมเบรนสลับกันให้เกิดเป็นช่องตรงกลาง เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการแยกเป็นช่องที่เป็นสารละลายที่เจือจางหรือปราศจากไอออน 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 แต่เป็นน้ำที่แยกไอออนออกโดยให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไป ทำให้ไอออนที่เป็นกลางยังคงอยู่ในน้ำ ไม่เคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.4 Electrodialysis Stack (Reynolds and Richards, 1996)

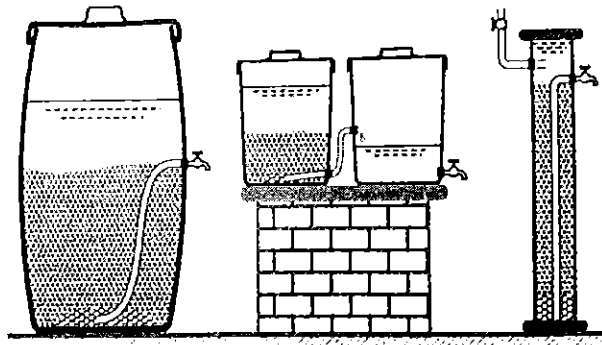
การทำงานของระบบจะขึ้นอยู่กับ กระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายแก่ระบบ อัตราการไหลของน้ำเสีย จำนวนเซลล์ที่ใช้ และความเข้มข้นของสารละลาย หากอัตราส่วนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density, CD) ต่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากเกินไป ซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าในระบบมากหรือความเข้มข้นของสารละลายน้อยเกินไป ทำให้เกิดแนวโน้มการตกผลึกบริเวณผิวของเยื่อกรอง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

2.3.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับกระบวนการดูดซับเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ต้องอาศัยวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ออกจากน้ำให้อยู่ในระดับความเข้มข้นที่ปลอดภัยได้ แม้ว่ากระบวนการเมมเบรนจะเป็นวิธีสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ดี แต่กระบวนการดูดซับก็ยังคงวิธีที่เข้าถึงได้ง่ายกว่า เนื่องจากเป็นวิธีมีราคาที่ถูกกว่า ในอดีตที่ผ่านมานักวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะแสวงหาวัสดุดูดซับชนิดใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่มากขึ้นและมีราคาที่ถูกลง วัสดุส่วนใหญ่ที่มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ 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 โดยเฉพาะวัสดุบางชนิดที่สามารถทำงานได้ดีเฉพาะสถานะที่ 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) โดยนำกระดูกสัตว์ที่ใช้ต้องเผาให้ ได้คุณภาพที่เหมาะสมจึงจะสามารถคงคุณสมบัติได้นาน และน้ำที่ผ่านกระบวนการจึงจะไม่มีสีและกลิ่นเป็นที่รังเกียจ กระดูกเมื่อแล้วต้องนำมาบดและคัดขนาดให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้ และทำการเปลี่ยนถ่านกระดูกใหม่เมื่อใช้งานจนหมดสภาพ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2545)



รูปที่ 2.5 เครื่องกรองถ่านกระดูกในครัวเรือน

การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยดินเผา ก็มีประสิทธิภาพต่ำ ไม่สามารถใช้กับน้ำที่มีฟลูออไรด์สูงเกิน 2 มก./ล. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่การใช้ Activated alumina ในการกำจัดฟลูออไรด์ ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำและความบริสุทธิ์ของสารเคมีที่ใช้ สามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้ 3-4 ครั้ง (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2545) อย่างไรก็ตาม ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ กระบวนการดูดซับก็ยังคงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายกว่าวิธีอื่น เมื่อเทียบกับการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า (Tripathy et al., 2006)

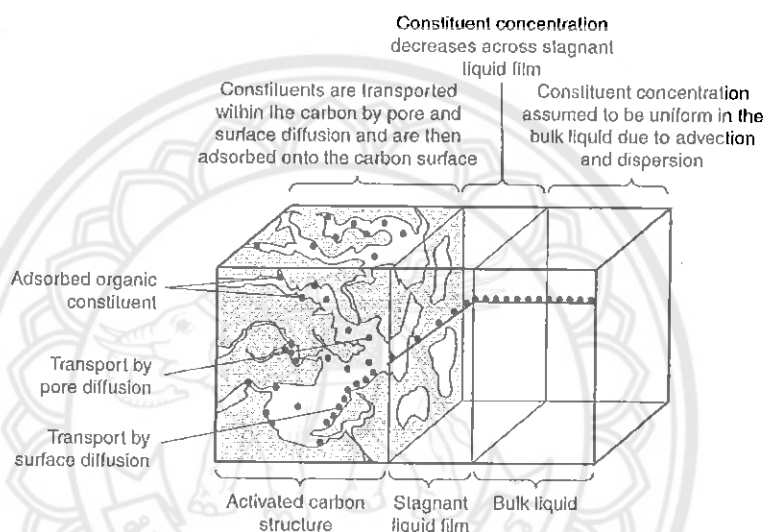
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

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

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

2.4.1 กลไกการดูดซับ

โดยปกติขั้นตอนการดูดซับของสารอินทรีย์บนวัสดุดูดซับมักถูกอธิบายด้วยประมาณ 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 5 คือ (1) การเคลื่อนที่ในสารละลาย (Bulk Solution Transport) (2) การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion Transport) (3) การเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน (Pore Transport) และ (4) การดูดซับ (Sorption) กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวและรูพรุนภายในโครงสร้างของวัสดุดูดซับ 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 กระบวนการจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับและเฟสของแข็ง (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 ซึ่งแบบจำลองทั้งสองจะใช้ในกรณีที่มีไอออนของสารละลายคงที่เท่านั้น

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 ปริมาณไอออนที่ดูดซับของมวลชีวะที่จุดสมดุล (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 จะให้ความลาดชันของกราฟมีค่าเท่ากับ $1/q_e$ และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ $1/b \cdot q_{\max}$

Freundlich Isotherm

ใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็น Heterogeneous แต่ไม่ได้สมมติว่าเป็น Monolayer เช่น วัสดุดูดซับที่เป็นชีวมวล เช่น ผัสดูดซับของจุลินทรีย์ หรือชีวมวลอื่นๆ แสดงได้ดังสมการ

$$q_e = kC_e^n$$

เมื่อ C_e	คือ ความเข้มข้นของอไอออนที่จุดสมดุล (mg/l)
q_e	คือ ปริมาณอไอออนที่ดูดซับของวัสดุดูดซับที่จุดสมดุล (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 ไม่ใช่แบบจำลองที่แท้จริง ในการอธิบายกระบวนการดูดซับทางชีววะ แต่เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางชีววะของ อไอออนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ในทางปฏิบัติจึงมักนำแบบจำลองทั้งสองมาใช้ เนื่องจากง่ายต่อการใช้งานและให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ความปั่นป่วน เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับ ขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านฟิล์ม และการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน ระดับความปั่นป่วนจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มน้ำที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ ส่งผลต่อความยากง่ายในการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับ

พีเอชของสารละลาย ส่งผลต่อความสามารถในการแตกตัวของสารต่างๆ ในน้ำจึงส่งผลต่อการดูดซับด้วย เช่น จากการศึกษาของ Nigamananda et al. (2005) พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์ของบอริกไซต์ที่มีไททานเนียมมากจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชของสารละลายและจะมีค่าสูงสุดที่พีเอช

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 ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่จะต้องควบคุมในขั้นตอนของการทดสอบ Adsorption isotherm เช่น จากการศึกษาคือของ 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 การดูดซับฟลูออไรด์ของบอไซท์ที่มีไททาเนียมมากจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ระดับสูงสุดภายในระยะเวลา 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 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลือบผิวอย่างสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ของ $Al(OH)_3$ ของสารส้ม (Alum) บนผิวของ AA ส่งผลให้รูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นที่ยอมรับว่า AA ที่ถูกเคลือบผิวด้วย $Al(OH)_3$ จะมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่สูงขึ้น (Tripathy et al., 2006)

Nigamananda et al. (2005) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วย พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนส่งผลทำให้บอไซท์ที่มีไททาเนียมมาก มีพื้นที่ผิวขึ้นตามอุณหภูมิในช่วง $120-600^\circ C$ ดังตารางที่ 7 และพบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ $300-400^\circ C$ ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 2.4 ผลของการบำบัดด้วยความร้อนต่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ (Nigamananda et al., 2005)

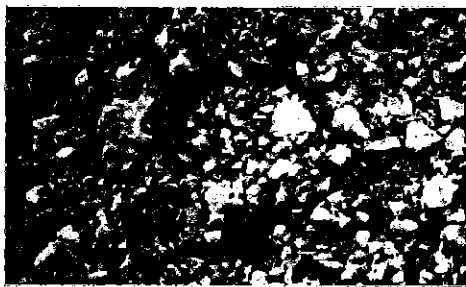
Calcination temp. (°C)	BET Surface area (m ² /g)	Surface area (m ² /g)
25	13.1	14.7
120	32.8	-
300	43.6	36
450	63.7	-
600	73.5	64.7
750	52.1	-
900	44.3	-

สมบัติของสารที่ดูดซับ ได้แก่ ขนาดโมเลกุล การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ดูดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของวัสดุดูดซับได้

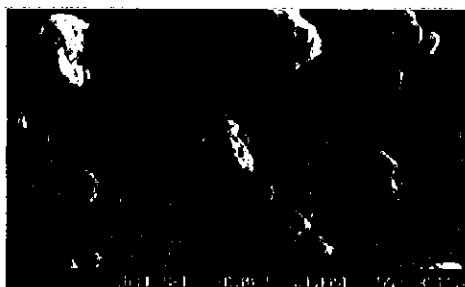
สารดูดซับอื่นๆ เช่น อีออนบวกหรือลบที่อยู่ในสารละลาย ที่สามารถแข่งขันกันในการดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเดียวกัน เช่น ลำดับความชอบในการดูดซับอีออนของ Activated alumina ในช่วง pH 5.5-8.5 ตามที่รายงานไว้ คือ $\text{OH}^- > \text{H}_2\text{AsO}_4^- > \text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^- > \text{HSeO}_3^- > \text{F}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > \text{I}^-$ (Farrak 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)

วัสดุดูดซับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย บ็อกไซต์และกากตะกอนจากการผลิตสารส้ม บ็อกไซต์เป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตสารส้ม ดังรูปที่ 1 (ก) ซึ่งเป็นบ็อกไซต์ตามธรรมชาติ และรูปที่ 7 (ข) มีองค์ประกอบเป็นอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น Gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Boehmite ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$) และ Diaspore ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$) รวมทั้งองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ Hematite (Fe_2O_3), Goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$), Quartz (SiO_2), Rutile/Anatase (TiO_2), Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) และสารเจือปนอื่นๆ ในปริมาณน้อย (Liu et al., 2009)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 บ็อกไซต์และภาพถ่าย SEM ของบ็อกไซต์ (Baral et al., 2007)

บ็อกไซต์เป็นสินแร่ลูมิเนียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องบินและรถไฟ โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา รวมทั้งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอะลูมินา ให้แก่อุตสาหกรรมอื่นๆต่อไป ได้แก่ วัสดุขัดผิว, ซีเมนต์, การผสมและการหลอมโลหะ นอกจากนี้บ็อกไซต์ยังใช้ในอุตสาหกรรมสี อะลูมิเนียมพอยด์ และอื่นๆ ขณะที่ปัจจุบันอะลูมิเนียมกำลังจะมาแทนที่ทองแดงในงานสายส่ง กระแสไฟฟ้า เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี,ม.ป.ป.)

บ็อกไซต์มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบด้วยออกไซด์ของอะลูมิเนียม, เหล็กและซิลิกอนในรูปของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ SiO_2 ร้อยละ 56.9, 16.9 และ 8.6 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของไททานเนียม, วาเคเดียม และแคลเซียม ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของบ็อกไซต์ในประเทศตุรกี (Erdem et al., 2004) และมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับบ็อกไซต์ในประเทศจีน ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญเป็น Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ SiO_2 ร้อยละ 55-65, 3-19 และ 6-15 ตามลำดับ (Liu et al., 2009)

Dasxet al. (2005) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่มโดยใช้ Activated titanium rich bauxite (TRB) ทำการทดสอบการดูดซับแบบทีละเท ศึกษาผลของระยะเวลาพัก, พีเอช, ปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้, ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ และผลของอิออนลบอื่นๆต่อการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดภายในช่วงระยะเวลา 90 นาที pH ที่เหมาะสมแก่การดูดซับอยู่ในช่วง 5.5-6.5 ความสามารถดูดซับฟลูออไรด์สูงสุดประมาณ 4.13 มก./ก. และพบว่าการกระตุ้นทางกายภาพด้วยความร้อนที่ 300-450 °C จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

นอกจากนั้นยังพบว่าออลอนบ่ออื่นๆที่พบในน้ำดื่มไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของ TRB อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีและธรณีวิทยาของบ็อกไซต์ (Erdem et al., 2004)

Chemical composition		Mineralogical composition	
Constituent	w/w (%)	Minerals	w/w (%)
Al ₂ O ₃	56.91	Boehmite [AlO(OH)]	59.10
Fe ₂ O ₃	16.95	Kaolinite [Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	11.34
SiO ₂	8.62	Diaspore [AlO(OH)]	1.76
TiO ₂	2.40	Haematite [α -Fe ₂ O ₃]	15.39
CaO	0.91	Anatase [TiO ₂]	1.49
CO ₂	0.78	Calcite [CaCO ₃]	1.29
P ₂ O ₅	0.13	Quartz [SiO ₂]	0.86
V ₂ O ₅	0.032	Amorphous substances and others	8.77
S	0.032		
LOI ^a	12.36		

^a LOI: loss on ignition (at 1000 °C).

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 order rate expression และข้อมูลสมดุลการดูดซับสอดคล้องทั้ง Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm แร่บ็อกไซต์(bauxite)เป็นแร่ผสมระหว่างไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งถือกันว่าเป็นพวกหินมีอยู่มากมายบนพื้นโลกของเรานี้พบว่ามีอยู่ 1 ใน 12 ส่วน จึงไม่ต้องกลัวว่าจะหมดไปจากโลกแร่บ็อกไซต์ไม่ใช่แร่บริสุทธิ์ชนิดเดียวแต่เป็นหินที่มีแร่สำคัญผสมกันอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ แร่ Boehmite (Boehmite) แร่ Diaspore (Diaspore) และแร่ Gibbsite (Gibbsite) ลักษณะคล้ายดิน มีสีเหลืองอมน้ำตาลหรือแกมแดงคล้ายสนิมเหล็ก สีเทา น้ำตาล เหลือง น้ำตาลแดง ซึ่งสีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กที่มีถ้าปริมาณเหล็กมากสีของแร่บ็อกไซต์จะเป็นสีน้ำตาล

แร่บ็อกไซต์มีสมบัติกายภาพ คือ ความแข็ง 1-3 ความถ่วงจำเพาะ 2-2.55 ความวาว ไม่มีมันจะด้านเหมือนดิน และองค์ประกอบทางเคมี คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 40-60 ซิลิการ้อยละ 1-15

เหล็กออกไซด์ร้อยละ 7-30 โทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3-4 และธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อย รวมทั้งสารเจือปนพวกควออตซ์ เหล็กไฮดรอกไซด์ แร่ดิน และเม็ดตะกอนขนาดทรายแป้งประกอบอยู่ด้วย ซึ่งเป็นตะกอนดินที่เดิมที่เหลื่ออยู่ในบริเวณเขตร้อนหรือใกล้เขตร้อนโดยพบอยู่ในรูปต่าง ๆ ได้แก่ มวลสารพอก (concretion) มวลฉนิ๊ก (compact) เม็ดถั่ว (pisolitic) หรือเม็ดแบบไข่ปลา (oolitic) เป็นต้น ศิลาแลงที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงก็จัดเป็น แร่บ็อกไซต์ด้วยเหมือนกัน

แร่บ็อกไซต์ไม่ได้มีอยู่ทั่วไปในโลก แหล่งใหญ่ ๆ มักอยู่ในแถบภูมิอากาศเขตร้อนชื้นหรือกึ่งร้อนชื้นคือใกล้เส้นศูนย์สูตรซึ่งมีความชื้นสูง ฝนตกชุก แร่บ็อกไซต์เกิดจากการผุพังสลายตัวของแร่ปฐมภูมิอะลูมิเนียมซิลิเกต และแร่ทุติยภูมิหรือแร่ดินภายใต้สภาวะค่อนข้างร้อนหรือร้อนจัด โดยเกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติแบบศิลาแลงของหินต้นกำเนิดที่เป็นได้ทั้งหินอัคนี หินตะกอน และหินแปรที่มีอะลูมิเนียมสูงเช่น เฟลด์สปาร์ (feldspar) ดินเหนียว (clay) ไมกา (mica) ซึ่งเมื่อผุสลายตัวแล้วจะให้ตะกอนตกค้างเป็นแร่บ็อกไซต์น้อย ๆ ซึ่งการสลายตัวตามธรรมชาติแบบศิลาแลงนั้นคือกระบวนการที่วัตถุต้นกำเนิดได้ผุพังสลายตัวปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ ออกมา ในสภาพแวดล้อมที่เป็นต่าง ซิลิกาจะถูกซึมชะละลายและถูกชะพัดพาออกไปจากหน้าดินพร้อมกับแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียมจึงทำให้มีการสะสมออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมในสภาพแวดล้อมที่เปียกและแห้งสลับกัน ทำให้ปริมาณของเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลของแหล่งแร่บ็อกไซต์บางแห่ง ได้แก่ แหล่งแร่บ็อกไซต์อาร์แคนซอส (Arkansas bauxite deposit) ซึ่งเป็นแหล่งแร่บ็อกไซต์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าแร่เฟลด์สปาร์ทั้งหลายเมื่อสลายตัวตอนแรกจะเปลี่ยนเป็นแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ต่อมาเมื่อซิลิกาในแร่ถูกชะล้างออกไปก็จะกลายเป็นแร่บ็อกไซต์ในที่สุด โดยที่ธาตุโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) จะละลายไปก่อน ต่อมาจึงเป็นซิลิกา (SiO₂) บางส่วนของชั้นแร่บ็อกไซต์ตอนบนจะถูกชะล้างพังทลายไปบ้าง จากแหล่งแร่เดิมแล้วไปสะสมตัวอยู่ตามแอ่งเล็ก ๆ ในทะเลใกล้ฝั่ง ต่อมาน้ำทะเลลึกมากขึ้น ทำให้มีตะกอนดินตกทับถมปิดทับคลุมบริเวณแหล่งแร่นี้ ทำให้กระบวนการเกิดตะกอน

ตกค้างนี้หยุดชะงักลง เมื่อมีการยกตัวของพื้นที่นี้อีกครั้งทำให้พื้นที่บางส่วนพังทลาย และทำให้แร่บ็อกไซต์ปรากฏให้เห็น และสามารถเปิดเหมืองแร่ได้

ประเทศที่มีแร่บ็อกไซต์ที่สำคัญ ได้แก่ ประเทศออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา จาไมกา รัสเซีย กินีบราซิล แคนาดา นอร์เวย์ ตุรกี ยูโกสลาเวีย ฝรั่งเศส อิตาลี สเปน อินเดีย และจีน เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยยังไม่พบการทำเหมืองแร่บ็อกไซต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะยังไม่พบสายแร่ชนิดนี้ในประเทศไทยคงพบแต่ศิลาแลงและดินลูกรัง ดังนั้นประเทศไทยจึงมีการนำเข้าแร่บ็อกไซต์โดยปริมาณการนำเข้าจะสูงขึ้นทุกปี คือ พ.ศ.2541 มีการนำเข้าประมาณ 94 ล้านบาท และ พ.ศ.2544 มีการนำเข้าประมาณ 138 ล้านบาท แร่บ็อกไซต์เป็นสินแร่ชนิดหนึ่งที่สำคัญที่ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น

อุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม

ปัจจุบันมีการใช้โลหะอะลูมิเนียมและสารประกอบอะลูมิเนียมกันทั่วโลก ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาความต้องการโลหะอะลูมิเนียมได้พุ่งขึ้นสูงกว่าโลหะสำคัญอื่น ๆ ทั้งในด้านปริมาณและมูลค่า เช่น มีการใช้อะลูมิเนียมสูงรองจากเหล็ก ประโยชน์ของอะลูมิเนียมสามารถแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือการใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือที่เรียกว่าอะลูมินาเมื่อแร่บ็อกไซต์ผ่านขบวนการแยกอะลูมิเนียมมาแล้ว ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมอะลูมินา ดังนี้

- โลหะเกรดอะลูมินา ซึ่งพบว่าสามารถแยกโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้ความรู้ทางโลหะวิทยา
 - อุตสาหกรรมอะลูมินาเคมี (industrial alumina chemical) สามารถแยกออกเป็น
 - อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) เป็นสารประกอบที่สำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมเคมีอย่างกว้างขวางในทุกวันนี้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สามารถจำแนกออกได้หลายรูปแบบ ทั้งแบบรูปผลึก (crystalline) และรูปเจล (gelatinous)
 - อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina) ก็คืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงถึง 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เพราะพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จะได้อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือ
 - อะลูมินารูปแบบ คอรันดัม (corundum ; $\alpha - Al_2O_3$) หรืออะลูมินากัมมันต์ ที่มีสมบัติในการดูดซับที่ดี
 - อะลูมินาที่ผ่านการเผา (calcined alumina) เป็นการนำ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มาเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ วัสดุขัด วัสดุทนไฟที่มีอะลูมินาสูง (refractory) ผลิตภัณฑ์แก้ว และเซรามิก เป็นต้น

16048419

น.

๓๑๕๒๓

๒๕๕๖

อุตสาหกรรมการผลิตสารส้ม (alum)

เราใช้สารส้มในกิจการน้ำประปามากที่สุดเพราะทำให้ตะกอนในน้ำตกเร็วขึ้น ช่วยทำให้การประปาไม่ต้องสร้างบ่อพักน้ำขนาดมหึมาจำนวนมาก นอกจากนี้ยังใช้สารส้มในอุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ในการแพทย์คือช่วยในการห้ามเลือด ฟอกโลหิต ใช้เป็นยาขับปัสสาวะให้ไต ใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องสำอาง ใช้เป็นสารระงับกลิ่นตัว ใช้เป็นส่วนผสมสีย้อมผ้าบางชนิด หรือแม้แต่ไม้ขีดไฟบางชนิดก็ยังมีสารส้มผสมอยู่ด้วย สารส้มที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่พบในเมืองไทยชาวบ้านเรียกว่า ดินส้ม อยู่ที่เขาภูสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดเลย แต่มีปริมาณน้อยมากไม่เพียงพอต่อผู้ใช้นุญยจึงหาวิธีผลิตขึ้นใช้เองโดยผลิตสารส้มจากแร่ที่มีปริมาณอะลูมิน่าสูง ซึ่งก็คือ บอริกไซด์สารส้มที่ผลิตได้มี 2 ชนิดคือ

สารส้มที่เป็นสารประกอบเกลือซัลเฟตเชิงซ้อน (double salt) เช่น โพแทสเซียม (KAI(SO₄)₂.12 H₂O) แอมโมเนียมอะลูมิเนียม (NH₄Al(SO₄)₂.12 H₂O) เป็นต้น สารส้มชนิดนี้มีลักษณะเป็นผลึกใสเป็นที่รู้จักกันดี และมีขายตามร้านค้าทั่วไป

สารส้มอีกชนิด คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต (Al₂(SO₄)₃.18 H₂O) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนขุ่นขาวแต่มีรสเปรี้ยวและค่อนข้างฝาดเล็กน้อย ละลายน้ำได้ดีกว่าชนิดเกลือซัลเฟตเชิงซ้อนนิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ดังนั้นบางที่เรียกว่า สารส้มดำ สำหรับทำ กระดาษ(papermaker's alum)

สารส้มที่ผลิตจากแร่บอริกไซด์อาจมีสิ่งเจือปน เช่น เหล็กและซิลิกาบ้างเล็กน้อย แต่สิ่งเหล่านี้ไม่เป็นอุปสรรคในการใช้ในกิจการน้ำประปา แต่ถ้านำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงจะต้องนำไปเข้าขั้นตอนการทำ ให้บริสุทธิ์อีกครั้ง

2.5.1 ประโยชน์ของแร่บอริกไซด์

ประโยชน์ของแร่บอริกไซด์มีมากมาย แร่บอริกไซด์ถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมหลายชนิด โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียมเนื่องจากแร่บอริกไซด์เป็นแร่ชนิดเดียวที่สำคัญที่สุดในการผลิตอะลูมิเนียม กล่าวคือร้อยละ 95 ของแร่บอริกไซด์หรือมากกว่า 100 ล้านตันต่อปีถูกนำไปใช้ในการผลิตอะลูมิเนียม นอกจากนี้ก็ยังใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารส้ม อุตสาหกรรมสารเคมี อุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียมออกไซด์ซีเมนต์เกรดสูงและอุตสาหกรรมอื่น ๆ แต่ก่อนที่จะนำไปใช้ต้องมีการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของแร่บอริกไซด์ด้วยว่ามีสมบัติเหมาะสมหรือไม่ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการได้ให้บริการในการตรวจวิเคราะห์ดังกล่าวแก่ผู้ประกอบการนำ เข้าจากต่างประเทศ

2.6 กากของเสียจากการผลิตสารส้ม (Alum waste)

กากของเสียจากการผลิตสารส้ม จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิตสารส้ม ดังตารางที่ 6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากกระบวนการผลิตสารส้มที่ผลิตจากคาโอลิน จากองค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีออกไซด์ของซิลิกอน และคาโอลินเป็นองค์ประกอบหลัก คือประมาณร้อยละ 40.0 และ 8.9 นอกจากนี้ยังรายงานว่ากากของเสียจากกระบวนการผลิตดังกล่าวปราศจากสารอันตรายจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ได้อย่างปลอดภัย (Nigussie et al., 2007)

Nigussie et al., (2007) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้กากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากคาโอลิน จากโรงงานผลิตสารส้มและกรดซัลฟิวริกในเอธิโอเปียโดยรวบรวมกากของเสียที่ได้มาทำการตากแห้งและบดให้มีขนาด 0.5-0.8 มม. ทำการทดสอบการดูดซับแบบที่ละเทศึกษาผลของระยะเวลาพัก, พีเอช, ปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้, ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ และผลของอิออนลบอื่นๆ ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า กากของเสียดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 153.8 มก./ก. การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกและเข้าสู่สมดุลในระยะเวลาประมาณ 1 ชม. ปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมเป็น 16 ก./ล. สำหรับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 10 มก./ล. ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์อยู่ในระดับคงที่ในช่วง pH 3-8 นอกจากนี้ยังพบว่าอิออนของไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 100-500 มก./ล. จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงขณะที่อิออนลบของคลอไรด์, ซัลเฟต, ฟอสเฟตและไนเตรต ไม่มีผลต่อการดูดซับในช่วงที่มีการศึกษาอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของกากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากคาโอลิน

(Nigussie et al., 2007)

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

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พรพิมล พัดภู (2547) ศึกษากำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้หินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครง โดยกระบวนการดูดติดผิว การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์ในน้ำตั้งเคราะห์ โดยการทดลองแบบที่ละเท ได้แก่ พีเอชขนาดของวัสดุดูดติดผิว และระยะเวลาสัมผัส หลังจากนั้น ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำตั้งเคราะห์ โดยใช้หินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครง โดยการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยดึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์ เมื่อใช้อัตราการกรอง ชนิดของวัสดุดูดติดกัน ความสูงของชั้นวัสดุติดผิวในถัง และความเข้มข้นของฟลูออไรด์เริ่มต้นแตกต่างกัน ขั้นตอนที่สองนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำบาดาล

จากผลการศึกษา พบว่า หินภูเขาไฟเป็นหินบะซอลต์ประกอบด้วยธาตุซิลิกา แคลเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม ส่วนเปลือกหอยแครงมีแคลไซต์ (แคลเซียมคาร์บอเนต) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จัดเป็นวัสดุดูดติดผิวธรรมชาติ ที่พีเอช 7 เป็นช่วงที่วัสดุดูดติดผิวทั้งสองชนิดสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ดีและเป็นช่วงที่ใกล้เคียงกับพีเอชของน้ำบาดาล ขนาดของหินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครงที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิว คือ 0.30-0.85 มม. ผลของเวลาสัมผัส พบว่า การดูดติดผิวฟลูออไรด์จะถึงสมดุลเมื่อใช้เวลา 2 ชม. ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ความสูงของชั้นวัสดุดูดติดผิว 60 ซม. หินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดฟลูออไรด์มากกว่า 85.00% เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำตัวอย่างจริงจากบ่อบาดาลที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ 8.10 มก./ล. พบว่า หินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดฟลูออไรด์ 94.80% และ 83.24% ตามลำดับ

อศุลย์ ศรีหิลา (2543) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนบนถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูก โดยใช้ฟลูออไรด์อิเล็กโทรดเป็นอุปกรณ์ในการวัด เริ่มจากการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่าถ่านทั้งสองชนิดมีแนวโน้มการดูดซับได้ดีในช่วง pH 7.5 จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ พบว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว สอดคล้องกับไอโซเทอร์ม การดูดซับแบบแลงเมียร์ ในขณะที่ถ่านกระดูกมีแนวโน้มเป็นแบบหลายชั้น ซึ่งยืนยันได้จากลักษณะไอโซเทอร์มเป็นแบบฟรอยด์ลิก โดยถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูกมีจำนวน โมลเฉลี่ยที่ให้ปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 6.6 mol/g และ 28 mol/g ตามลำดับ เมื่อศึกษาปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนบนถ่านกระดูกสีต่างๆ กัน พบว่าถ่านกระดูกสีเทาปนแดงมีปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนสูงสุด

ดิยฉัตร ทองแป้น(2545) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์จากในแหล่งน้ำใต้ดินจากบ้านป่าเหียง จังหวัดลพบุรี ซึ่งน้ำตัวอย่างมีปริมาณฟลูออไรด์ 10.000 - 14.000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยกระบวนการดูดซับด้วยแอดติเวตเตดอลูมินามาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟลูออไรด์เพื่อหาปแอบซอร์ปชัน ไอโซเทอม (Adsorption Isoterm) ของแอดติเวตเตดอลูมินา และหาสภาวะที่

เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวิธีที่ละเท (Bath experiment) แบบเขย่าและแบบแช่แอดคิเวตเตดอลูมินาลงในน้ำตัวอย่าง จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการดูดซับด้วยแอดคิเวตเตดอลูมินาเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของฟรูดลิช (Freudlich Adsorption Isoterm) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างที่สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงสุดเท่ากับ 6.5 แต่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มของกรมอนามัย จึงได้ใช้สารส้มช่วยในการลดตะกอนความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ในการตกตะกอน 500.00 – 600.00 มิลลิกรัม/ลิตร จากการทดลองวิธีที่ละเทแบบเขย่าใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 500.00 มิลลิกรัม/ลิตรและใช้แอดคิเวตเตดในการดูดซับ ใช้เวลาในการเขย่า 8.0 ชั่วโมง ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับ 95.07 เปอร์เซ็นต์ และวิธีที่ละเทโดยแช่แอดคิเวตเตดอลูมินาลงในน้ำตัวอย่างใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 600.00 มิลลิกรัม/ลิตรและใช้แอดคิเวตเตดอลูมินาในการดูดซับ ระยะเวลาในการแช่ 10.0 ชั่วโมง ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับ 99.69 เปอร์เซ็นต์

อลงกต ไชยอุปละ(2541) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของฟลูออไรด์และขนาดของถ่านกระดูกที่มีต่อการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม โดยได้มีผลการศึกษาผลของความเข้มข้นได้ใช้ถ่านกระดูก 2 ชนิดที่บรรจุไว้ในแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ น้ำตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นโดยการละลายโซเดียมฟลูออไรด์ในน้ำประปาให้มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ 3 5 7 และ 10 มก./ล สำหรับการศึกษาผลของขนาดของถ่านกระดูกได้ทำได้โดยเลือกใช้ถ่านชนิด A ที่มีขนาดตั้งแต่ 12 16 20 และ 40 mesh และใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีฟลูออไรด์ 10 มก./ล การดำเนินระบบเป็นแบบไหลลงอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลที่คงที่เท่ากับ 0.43 BV/hr (0.26 m³/m²·hr) นอกจากนี้ยังทำการหาค่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกโดยการทดลองแบบแบทช์ด้วย

การศึกษาผลของความเข้มข้นพบว่าที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 3-10 มก./ล ถ่านชนิด A มีค่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่จุดสมดุลอยู่ในช่วง 2.25-3.64 มก./ก ค่า MTZ มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้ามีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 11 17 27 69 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นทางน้ำเข้า 3 5 7 และ 10 มก./ล ตามลำดับ สำหรับถ่านชนิด B ผลการศึกษาในช่วงความเข้มข้นฟลูออไรด์ของน้ำเข้า 3-10 มก./ล พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่จุดสมดุลต่ำกว่าถ่านชนิด A โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.45-1.01 มก./ก. และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้าไม่มีผลต่อค่า MTZ โดยพบว่าค่า MTZ มีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วง 101-111 เซนติเมตร

สำหรับการศึกษาผลของขนาดถ่านกระดูกพบว่าการเดินระบบโดยใช้ถ่านขนาด 12-40 mesh มีค่าความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ที่จุดสมดุลอยู่ในช่วง 2.25-4.061 มก./ก. ค่า MTZ อยู่ในช่วง 36-69 เซนติเมตร โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของถ่านกระดูกไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์และ MTZ อย่างเด่นชัด

ผลการศึกษาแบบแบทช์แสดงให้เห็นว่ารูปแบบในการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านชนิด A เป็นไปตามสมการของ Freundlich และให้ค่า Freundlich ไอโซเทอมสูงสุดเมื่อใช้ถ่านขนาด 16 mesh โดยมี

ค่า n เท่ากับ 0.33 ค่า K_f เท่ากับ 0.02 ส่วนถ่านชนิด B ไม่สามารถหาค่าไอโซเทอมได้เนื่องจากไม่สามารถหาสมการที่เหมาะสมทำนายข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ดวงพร แก่นแก้ว และ อัจฉรา ดวงเดือน(2549)ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้เม็ดดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำ โดยทำการศึกษาสัดส่วนการผสมระหว่างดินเหนียวกับเถ้าแกลบดำ ปัจจัยในการดูดซับฟลูออไรด์โดยวิธีแบบที่ละเท ประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์และการฟื้นฟูสภาพเม็ดดูดซับโดยวิธีไหลลงแบบต่อเนื่อง จากผลการศึกษา พบว่า สัดส่วนการผสมระหว่างดินเหนียวกับเถ้าแกลบดำเพื่อนำมาใช้เป็นสารดูดซับ คือ 3:1ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของฟลูออไรด์ โดยใช้ดินเหนียวที่ปรับคุณภาพด้วยเถ้าแกลบดำคือ 6-7 เวลาสัมผัสจนถึงจุดสมดุลคือ 3 ชั่วโมง เมื่อนำมาทดลองกับน้ำบาดาลโดยการเดินระบบต่อเนื่อง ที่อัตรากรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.- ชม. ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลเริ่มต้น 13.81 มก./ล. พบว่า ดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำมีอายุการใช้งานนาน 19 ชั่วโมง จึงหมดประสิทธิภาพ ผลการฟื้นฟูดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำที่หมดสภาพแล้ว โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ซึ่งสามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจนได้ค่ามาตรฐานแต่อายุการใช้งานลดลงจากเดิม

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

การศึกษากำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซด์และของเสียจากการผลิตสารส้มในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด ศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับ และศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับ ได้แก่พีเอชของสารละลาย และขนาดของวัสดุดูดซับที่ใช้ โดยมีแผนการทดสอบรายละเอียดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

จ. สารเคมี

1. สารละลายสต็อกฟลูออไรด์เข้มข้น (Stock Fluoride Solution) สารละลายแอนไฮดรัสโซเดียม ฟลูออไรด์ (NaF) 221.0 มก. ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร

สารละลายนี้ 1.00มล. = ฟลูออไรด์ 100 ไมโครกรัม

2. สารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ (Standard Fluoride Solution) เจือจางสารละลายฟลูออไรด์เข้มข้น 100 มล. ให้เป็น 1,000มล. ด้วยน้ำกลั่น

สารละลายนี้ 1.00มล. = ฟลูออไรด์ 10.0 ไมโครกรัม

3. สารละลาย SPADNS

ละลาย SPADNS [Sodium 2 -- (Parasulphophenylazo)-1,8-Dihydroxy -3,6- Naphthalenedisulfonate หรือเรียกชื่อหนึ่งว่า 4,5- Dihydroxy -3- (Parasulphophenylazo) -2,7-Naphthalenedisulfonic Acid Trisodium Salt] 958 มก. ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 500มล. สารละลายนี้สามารถเก็บได้นานอย่างน้อย 1 ปี ถ้าป้องกันไม่ให้ถูกแสง

4. สารละลายกรดเซอร์โคเนียล (Zirconyl – Acid Reagent)

ละลายเซอร์โคเนียลคลอไรด์ (Zirconyl Chloride Octahydrate, $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$) 133มก. ในน้ำกลั่น 25 มล. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 350มล.แล้วเจือจางเป็น500มล.ด้วยน้ำกลั่น

5. สารละลายผสม Acid Zirconyl – SPADNS

ผสมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอร์โคเนียลอย่างละเท่าๆ กัน สารละลายผสมนี้เก็บรักษาได้อย่างน้อย 2 ปี

6. สารละลายอ้างอิง

เจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 7 มล.ด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1 มล.แล้วเติมลงในสารละลายเจือจาง SPADNS ที่เกิดจากการเติมสารละลาย SPADNS 10 มล. ลงในน้ำกลั่น 100มล. สารละลายที่ได้นี้จะใช้ปรับเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้เป็น100%T (หรือเท่ากับ Blank) สารละลายนี้คงเก็บตัวได้นานอย่างน้อย 1

7. สารละลายโซเดียมอาร์เซไนท์ (Sodium Arsenite Solution)

ละลาย $NaAsO_2$ 5 กรัม แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (ควรรวมักระวังสารนี้มีพิษ)

ก. วิธีวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมอนุกรมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ให้มีความเข้มข้น 10,20,30,40,50 และ 60 ไมโครกรัม โดยปีปตสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ (1 มล. เท่ากับ 10 μ g F) มา 1,2,3,4,5 และ 6 มล. ลงใน Nessler tube ขนาด 50มล. แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 50มล. เติลงในขวดรูปกรวยแล้วเติมสารละลายผสม Acid Zirconyl – SPADNS 10 มล. ลงในทุกขวด เขย่าให้เข้ากัน หรืออาจจะเติมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอโคนิลอย่างละ 5มล. เขย่าให้เข้ากัน นำไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายอ้างอิงเป็น Blank ในการปรับ 100%T ของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็น ไมโครกรัมและ %T ที่อ่านได้จากแต่ละความเข้มข้นโดยใช้กราฟ SEMILOG

2. วิเคราะห์ตัวอย่าง

2.1 ตวงตัวอย่างน้ำ 50 มล. ใส่ในขวดรูปกรวย หรือปริมาณน้อยกว่าแล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 50มล.

2.2 เติมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอโคนิลอย่างละ 5มล. หรือ สารละลายผสม Acid Zirconyl – SPADNS 10 มล. ลงในตัวอย่างน้ำ เขย่าให้เข้ากันและนำไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 570นาโนเมตร โดยใช้สารละลายอ้างอิงเป็น Blank อ่านค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็นไมโครกรัมจากกราฟมาตรฐานที่เตรียม

ข. การคำนวณ

$$\text{ฟลูออไรด์, มก/ล} = A / \text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}$$

เมื่อ A = ไมโครกรัมของ F ที่อ่านได้จากกราฟ

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุชุดขับ

- บ็อกไซต์ (Bauxite) (นำมาจากบริษัททำไทย จำกัด)
- ของเสียจากการผลิตสารส้ม (Alum waste) (นำมาจากบริษัททำไทย จำกัด)

3.2.2 สารเคมี

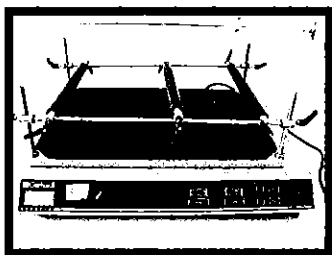
- Sodium fluoride (NaF)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Zirconyl chloride octahydrate ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$)
- Sulfanilic acid azochromotrop
- Hydrochloric Acid (HCl)

3.2.3 เครื่องแก้ว

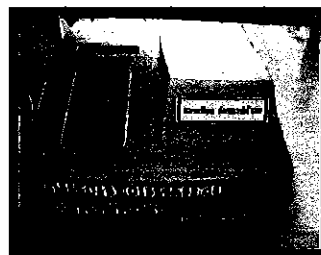
- ปิเปตปริมาตร
- บีกเกอร์
- ขวดรูปชมพู่
- ขวดแก้วใส่สารจุกแก้ว

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

- pH-meter
- ตะแกรงร่อน (Sieve)
- Spectrophotometer แบบ VIS ยี่ห้อ Thermo Scientific
- เครื่องเหวี่ยงสารร่วน (Centrifuge ของ SANYO FALCON 6/300)
- เตาอบ (Programmable lab oven)
- เครื่องเขย่าตามแนวราบ (Horizontal Shaker)
- เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง (Balance)
- ไซริงบอล
- ถังมือยาง
- ช้อนตักสาร
- ขวดน้ำกลั่น



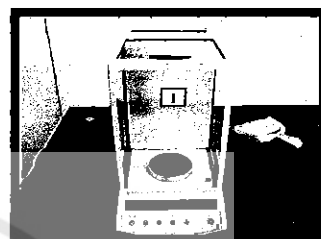
เครื่องชั่ง



สเปกโตรโฟโตมิเตอร์



เครื่องเหวี่ยง



เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง

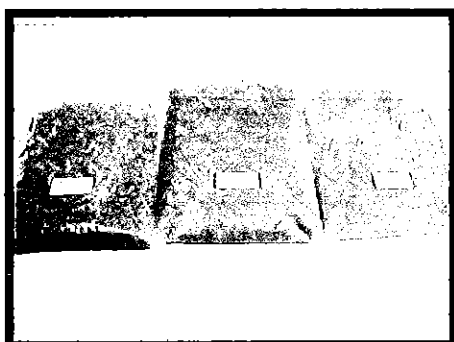
รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3 การเตรียมวัสดุชุดขับ

3.3.1 การเตรียมบ็อกไซต์

➤ นำบ็อกไซต์มาทุบให้เป็นก้อนเล็กๆแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4, 8, 16 และ 40 ตามลำดับ เพื่อคัดแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38- 4.76, 1.19-2.38 และ 0.42-1.19 มิลลิเมตร

- อบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



บ็อกไซต์



ของเสียจากการผลิตสารส้ม

รูปที่ 3.3 วัสดุชุดขับ

3.3.2 การเตรียมของเสียจากการผลิตสารส้ม

- นำของเสียจากการผลิตสารส้มที่ได้มาจากบริษัท ทาไทย จำกัด ขนาด 1-2.5 มิลลิเมตร มาทำการอบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป
- เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป

3.4 เตรียมสารละลายฟลูออไรด์

เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม โดยชั่งโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ปริมาณ 10.75 มิลลิกรัม นำมาละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร จะได้ สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

3.5 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์

- นำบ็อกไซต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76 มิลลิเมตร ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ ค้างบนเบอร์ 8 และของเสียจากการผลิตสารส้ม จำนวนอย่างละ 4 กรัม ใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร จำนวนอย่างละ 7 ขวด
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดพีเอชด้วย pH meter ใส่ขวดพลาสติกดังกล่าว จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร
- นำขวดพลาสติกดังกล่าวไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 1, 3, 6, 12, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง ตามลำดับ
- เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำมาแยกวัสดุดูดซับออกจากสารละลายฟลูออไรด์จากนั้น นำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่จุดสมดุลของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด

3.6 การศึกษาหาไอโซเทิร์มของวัสดุดูดซับ

- นำบ็อกไซต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76 มิลลิเมตร ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ ค้างบนเบอร์ 8 มาจำนวน 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม ตามลำดับ และของเสียจากการผลิตสารส้มมาจำนวน 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัมตามลำดับ มาใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดพีเอชด้วย pH meter ใส่ขวดพลาสติกดังกล่าว จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร
- นำขวดพลาสติกทั้งหมด ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที่ เขย่าเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาสัมผัสที่ต้องการทดลองที่ 3.4
- เมื่อเขย่าเสร็จจนครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำมาแยกวัสดุดูดซับออกจากสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที่ เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาไอโซเทอมของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ว่าสอดคล้องตามสมการของ Freundlich Isotherm หรือ Langmuir Isotherm

3.7 การศึกษาผลของขนาดของวัสดุดูดซับต่อการดูดซับฟลูออไรด์

- นำบ็อกไซต์จำนวน 3 ขนาด คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76, 1.19-2.38 และ 0.42-1.19 มิลลิเมตร ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16, 40 มาจำนวนขนาดละ 4 กรัม
- นำบ็อกไซต์ทั้ง 3 ขนาด มาจำนวนขนาดละ 4 กรัม นำมาใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชวัดพีเอชด้วย pH meter ใส่ขวดพลาสติกทั้ง 3 ขวด จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร
- นำขวดพลาสติกทั้ง 3 ขวด ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที่ เขย่าเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาสัมผัสที่ต้องการทดลองที่ 3.4

3.8 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับฟลูออไรด์

- นำบ็อกไซต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76 มิลลิเมตร ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ ค้างบนเบอร์ 8 และของเสียจากการผลิตสารส้ม จำนวนอย่างละ 4 กรัม (80 กรัม/ลิตร) ใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร จำนวนอย่างละ 5 ขวด
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดพลาสติกดังกล่าว จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร โดยที่ปรับพีเอช ให้เป็น 3, 4.5, 7, 9 และ 11 ตามลำดับโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับพีเอช
- นำขวดพลาสติกทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เขย่าเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาสัมผัสที่ต้องการทดลองที่ 3.4
- เมื่อเขย่าเสร็จจนครบเวลาที่กำหนดแล้วนำมาแยกวัสดุดูดซับออกจากสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

การทดลองในครั้งนี้ทำการศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยวัสดุดูดซับ 2 ชนิด คือ บ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม โดยทำการทดลองกับน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับฟลูออไรด์ โดยทำการทดลองศึกษาเวลาสัมผัส ไอโซเทอมของการดูดซับ ผลของขนาดต่อการดูดซับและศึกษาความเป็นกรด-เบสที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับตามลำดับ โดยมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์

4.1.1 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับบ็อกไซต์และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเพิ่มเวลาเขย่าเป็น 3, 6, 12, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง ตามลำดับ จนกว่าค่าสัดส่วนของความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล

ผลการศึกษาเวลาสัมผัสในการการดูดซับฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยบ็อกไซต์พบว่า ภายหลังจากดูดซับที่สภาวะเดียวกันพบว่าที่เวลา 3 ชั่วโมง การดูดซับฟลูออไรด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและการดูดซับจะเริ่มคงที่ที่เวลา 24 ชั่วโมง คือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุดจากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

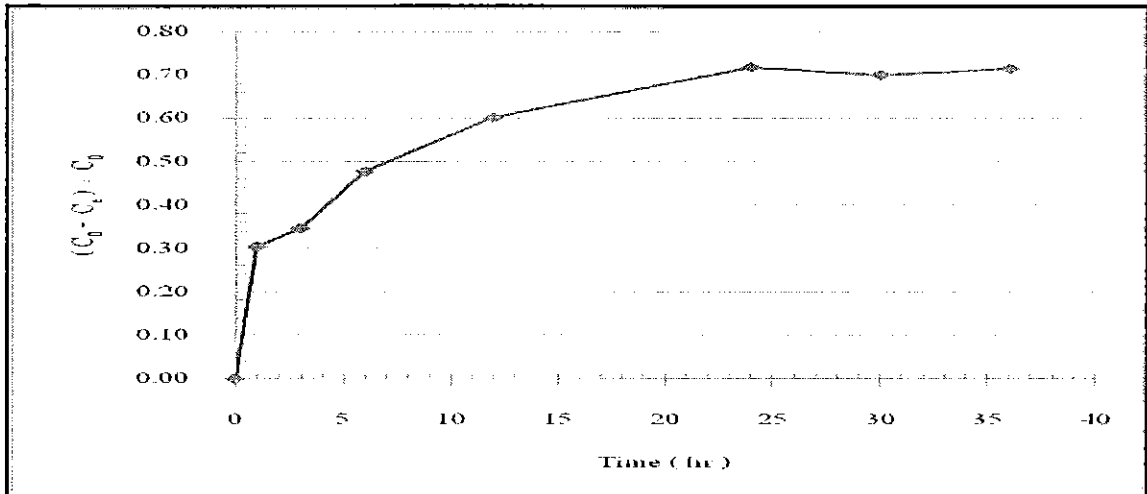
4.1.2 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมและ ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับบ็อกไซต์และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเพิ่มเวลาเขย่าเป็น 3, 6, 12, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.1 ตามลำดับ จนกว่าค่าสัดส่วน ของความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล

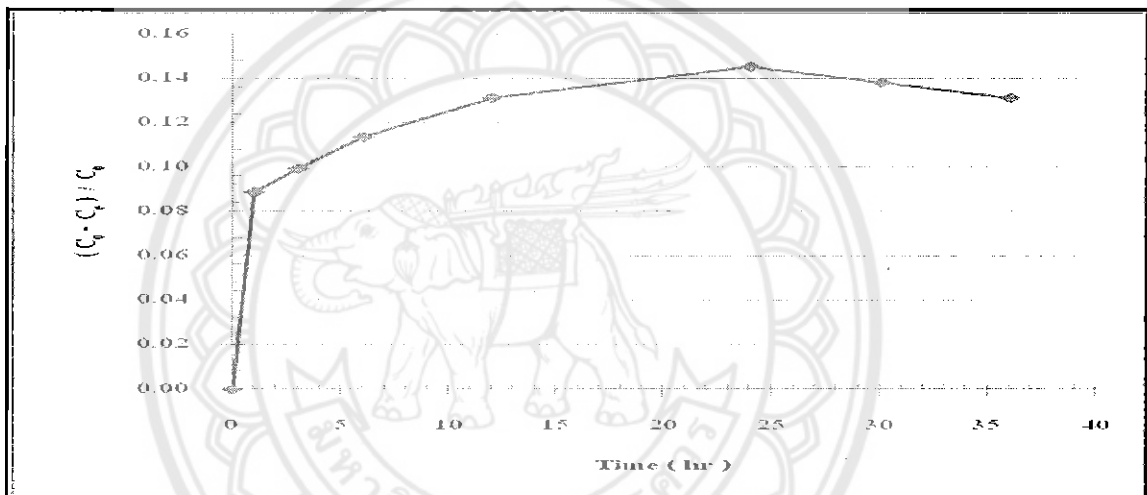
ผลการศึกษาเวลาสัมผัสในการการดูดซับฟลูออไรด์ออกจากรีดน้ำด้วยของเสียจากการผลิต สารส้มพบว่า ภายหลังจากดูดซับที่สภาวะเดียวกันพบว่าที่เวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 24 ชั่วโมง และจะเกิดการดูดซับฟลูออไรด์ขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 3 ชั่วโมงแรก เช่นเดียวกับระยะเวลาสัมผัส เข้าสู่สมดุลของบ็อกไซต์ ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์และของเสียจากการผลิตสารส้ม

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	สัดส่วนความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับต่อฟลูออไรด์เริ่มต้น ($(C_0 - C_t)/C_0$)	
	บ็อกไซต์	ของเสียจากการผลิตสารส้ม
1	0.30	0.09
3	0.35	0.10
6	0.48	0.11
12	0.60	0.13
24	0.72	0.15
30	0.70	0.14
36	0.72	0.13



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมของบ็อกไซต์



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมของของเสียจากการผลิตสารส้ม

4.2 ผลการทดลองการศึกษาหาไอโซเทิร์มของวัสดุดูดซับ

4.2.1 ผลการทดลองการศึกษาไอโซเทิร์มของบ็อกไซต์

การทดลองการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์ ด้วยการใช้ น้ำที่มีสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร โดยกำหนดขนาดเป็นบ็อกไซต์ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และให้มีน้ำหนักเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับจากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่สภาวะเดียวกันและใช้เวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.4 หลังจากนั้นนำน้ำที่ได้จากการทดลองไปวัดค่าฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่และสามารถนำข้อมูลมาเขียนเส้นไอโซเทอมของการดูดซับได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

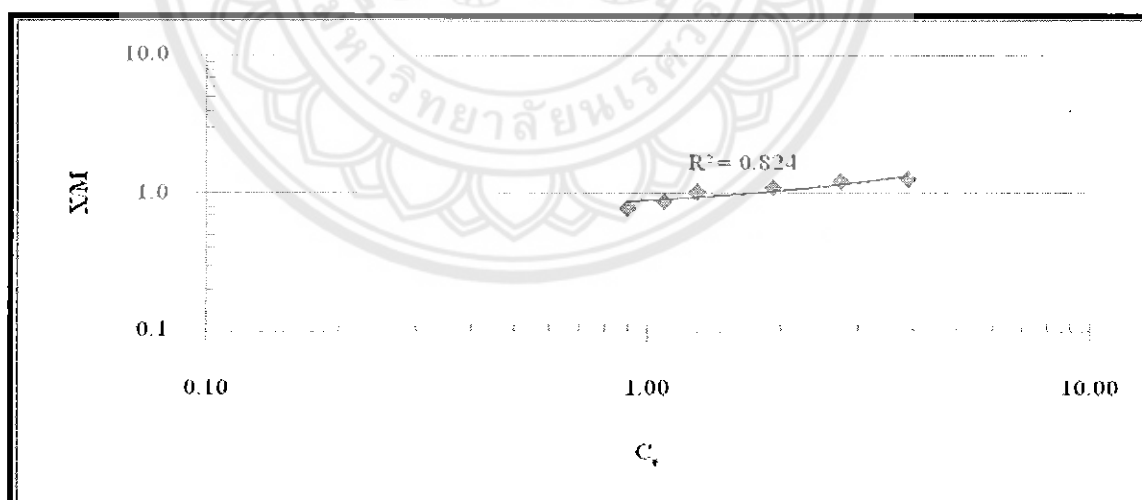
ผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ของไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ

Langmuir และไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Freundlich พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่าการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์ที่นำมาเขียน ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Langmuir ความเหมาะสมมากกว่า พิจารณาค่าคงที่ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอรั่มแบบ Langmuir ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งไอโซเทอรั่มของการดูดซับเป็นดังนี้ สำหรับบ็อกไซต์จากรูปที่ 4.4 จะได้ค่าคงที่ Langmuir ได้แก่ $a = 1.876$ และ $b = 0.779$ ได้สมการดังนี้

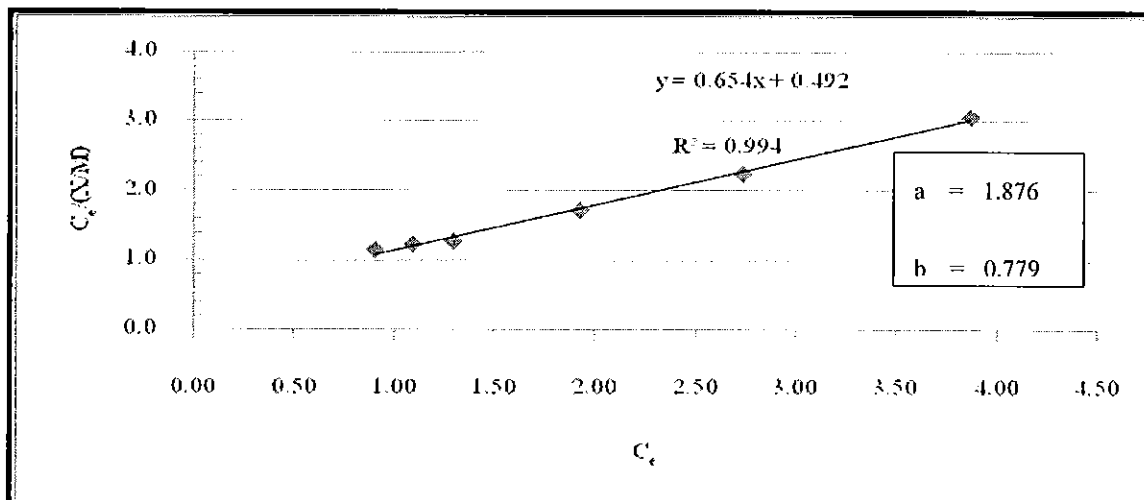
$$\frac{C_e}{(X/M)} = 0.684 + 0.533C_e$$

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Isotherm ของบ็อกไซต์

M (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)
1.0	6.39	3.87
2.0	6.39	2.73
3.0	6.39	1.92
4.0	6.39	1.30
5.0	6.39	1.09
6.0	6.39	0.90



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของบ็อกไซต์



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของบ็อกไซต์

4.2.2 ผลการทดลองการศึกษาไอโซเทิร์มของของเสียจากการผลิตสารส้ม

การทดลองการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม ด้วยการใช้น้ำที่มีสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยกำหนดขนาดให้ของเสียจากการผลิตสารส้ม ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และให้มีน้ำหนักเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับจากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่สภาวะเดียวกันและใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.4 หลังจากนั้นนำน้ำที่ได้จากการทดลองไปวัดค่าฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่และสามารถนำข้อมูลมาเขียนเส้นไอโซเทิร์มของการดูดซับได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

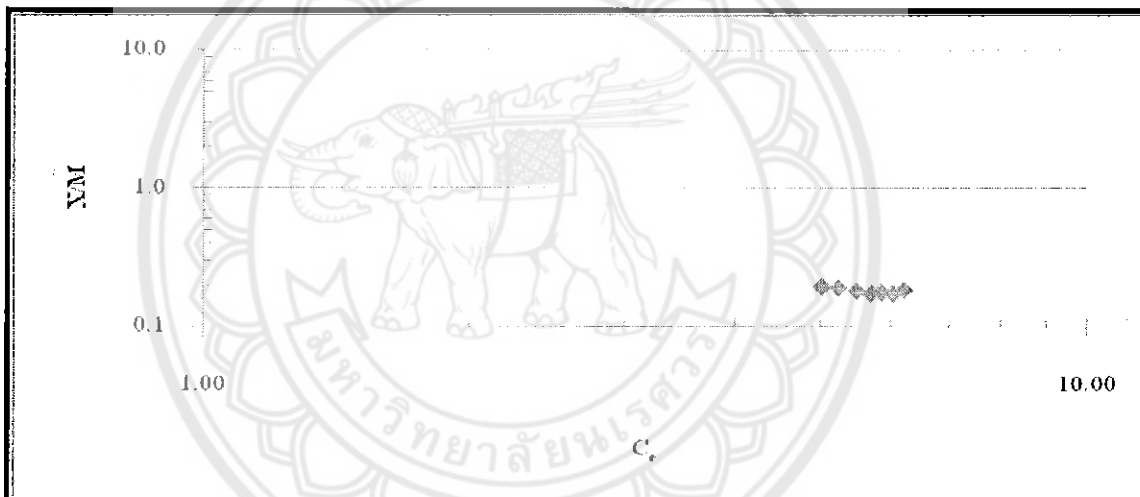
เมื่อพิจารณาสมการดูดซับของฟลูออไรด์โดยนำข้อมูลมาทดสอบตามแบบจำลองการดูดซับของ Freundlich และของ Langmuir ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลองของ Freundlich และ Langmuir ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

จากค่า R^2 ของทั้งสองแบบจำลองพบว่าไอโซเทิร์มแบบ Langmuir มีค่าเท่ากับ 0.858 แสดงว่าไอโซเทิร์มการดูดซับของฟลูออไรด์บนของเสียจากการผลิตสารส้มสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองของ Langmuir การที่ค่า R^2 ของแบบจำลองแบบ Langmuir มีค่าสูงกว่าของแบบจำลองของ Freundlich แสดงว่าการดูดซับของฟลูออไรด์บนของเสียจากการผลิตสารส้มเป็นการดูดซับโดยกลไกทากายภาพซึ่งเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจากรูปทำให้ค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับของบ็อกไซต์เป็นดังนี้ สำหรับของเสียจากการผลิตสารส้มจากรูปที่ 4.6 จะได้ค่าคงที่ Langmuir ได้แก่ $a = 0.1981$ และ $b = 1.5619$ ได้สมการดังนี้

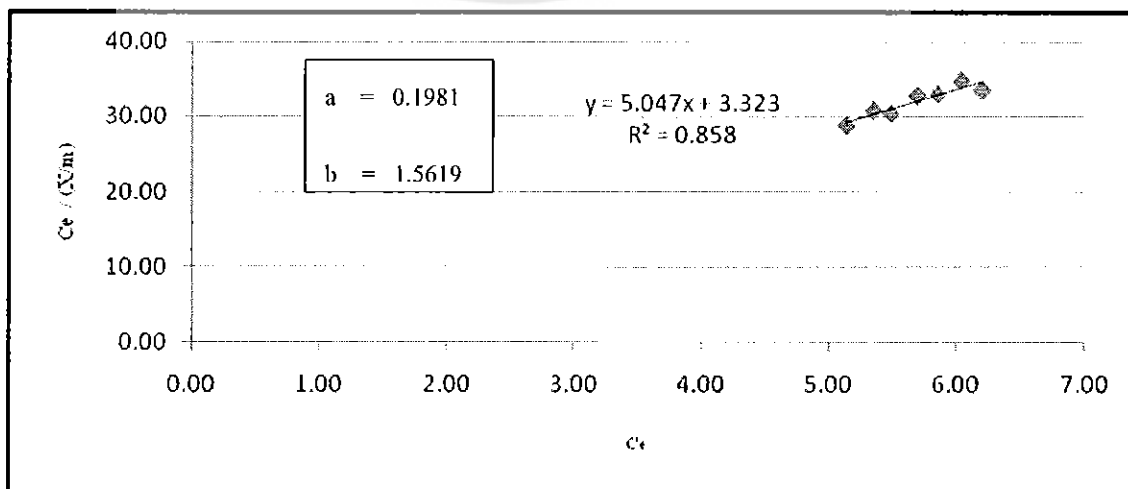
$$\frac{C_e}{(X/M)} = 3.232 + 5.047C_e$$

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

M (g)	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)
1.0	6.39	6.20
2.0	6.39	6.04
3.0	6.39	5.86
4.0	6.39	5.69
5.0	6.39	5.23
6.0	6.39	5.02



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

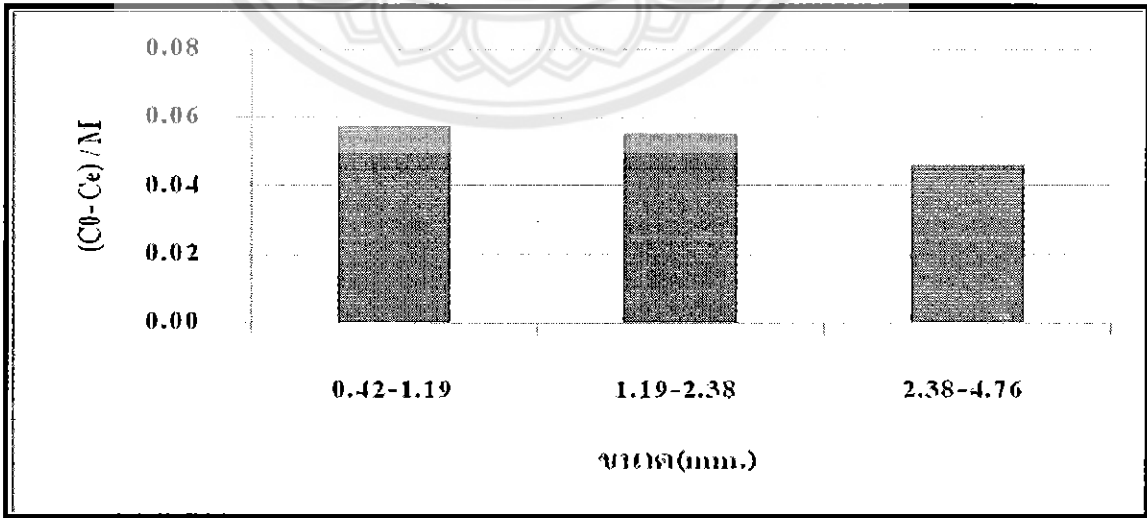
4.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์

4.3.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบอกลี

จากการบดบอกลีแล้วนำไปร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรง บอกลีที่ได้มีขนาดเป็นช่วงกว้าง เนื่องจากการร่อนแยกบอกลีไม่ได้ใช้เครื่องแยกที่ทันสมัย แต่นำตะแกรงร่อนมาวางซ้อนกันดังนี้ ตะแกรงร่อนเบอร์ 4 เบอร์ 8 และเบอร์ 16 ตามลำดับ จากผลการศึกษาตาราง 4.4 พบว่า ปริมาณการดูดซับฟลูออไรด์ของบอกลีขนาด 2.38 – 4.76 , 1.19 – 2.38 , 0.42 – 1.19 เท่ากับ 0.9277, 1.1186 และ 1.1534 มิลลิกรัมต่อกรัมของบอกลี ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขนาดของบอกลีแต่ละขนาดมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามบอกลีที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการดูดซับฟลูออไรด์ได้มากกว่าบอกลีที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าซึ่งเป็นไปได้ตามทฤษฎีที่กล่าวว่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อวัสดุดูดซับมีขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบอกลี

ขนาด (mm)	M (g)	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)
0.42 – 1.19	4.0	6.16	1.55
1.19 – 2.38	4.0	6.16	1.69
2.38 – 4.76	4.0	6.16	2.45



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบอกลี

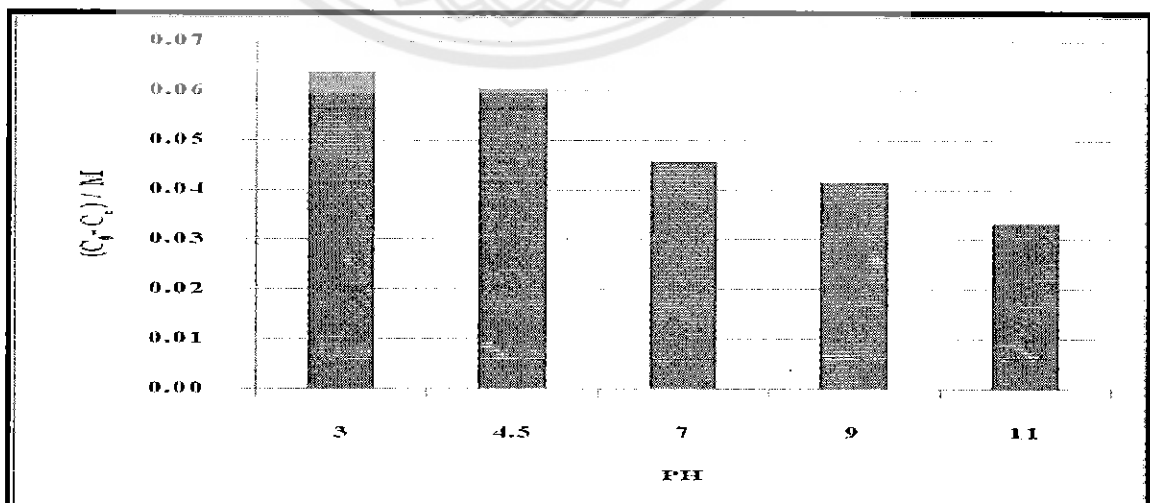
4.4 ผลการทดลองผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์

4.4.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเท่ากับ 3, 4.5, 7, 9 และ 11 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณบ็อกไซต์ที่เหมาะสมและนำไปแช่อยู่ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที และเพิ่มเวลาการแช่โดยใช้เวลาสัมผัสจากการทดลองที่ 3.4

จากการทดลองพบว่าเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายเพิ่มขึ้น จากช่วง 3.0-4.5 ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์จะใกล้เคียงกันแต่จะลดลงอย่างมากเมื่อความเป็นกรด-เบสมากกว่า 4.5 ขึ้นไป ซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่อความเป็นกรดเบสมากขึ้นทำให้เกิดสารเชิงซ้อนไฮดรอกซิลของฟลูออไรด์ที่มีสภาพความเป็นลบมากขึ้น จึงเกิดการผลัดกับประจุลบที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งอยู่บนผิวของบ็อกไซต์รวมถึงขนาดของฟลูออไรด์มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงเข้าถึงผิวของบ็อกไซต์ได้น้อยลงซึ่งทำให้การดูดซับลดลง (Ajmal Mohamad, 2003)

และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการดูดซับฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบชนิดและที่มาของบ็อกไซต์เนื่องจากบ็อกไซต์ที่มีองค์ประกอบที่ต่างกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์แต่ละชนิดแตกต่างกัน

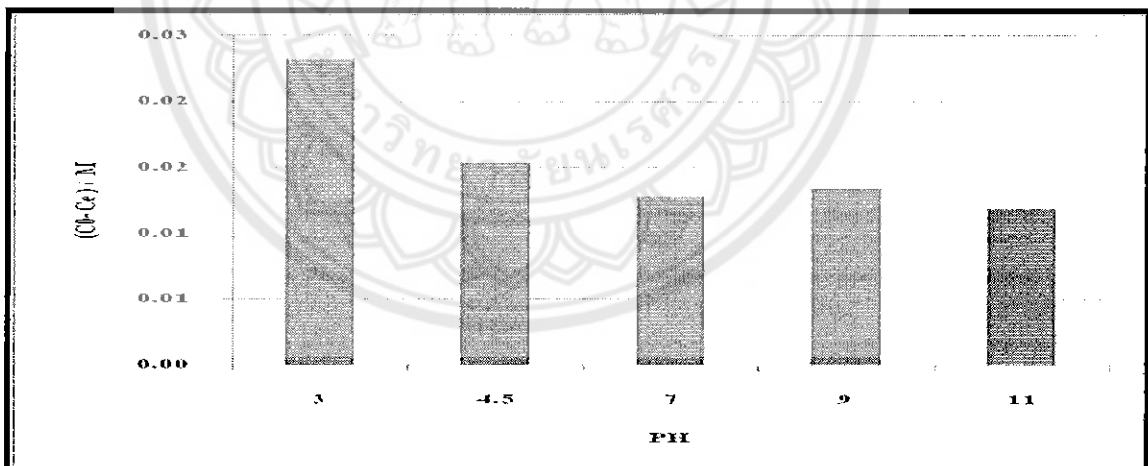


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

4.4.2 ผลการทดลองการศึกษาผลของpHต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของกรด-เบสที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเท่ากับ 3 , 4.5 , 7 , 9 และ 11 ซึ่งปรับความเป็นกรด-เบส ด้วยสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณของเสียจากการผลิตสารส้มที่เหมาะสมและนำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที และเพิ่มเวลาการเขย่าโดยใช้เวลาสัมผัสจากการทดลองที่ 3.4

จากการทดลองพบว่าเมื่อความเป็นด่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือในสภาวะที่สารละลายเป็นเบสหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของของเสียจากการผลิตสารส้ม จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของของเสียจากการผลิตสารส้มการขณะที่ฟลูออไรด์ก็มีประจุเป็นลบด้วยเช่นทำให้เกิดการผลักกันของประจุขึ้นระหว่างของเสียจากการผลิตสารส้มกับฟลูออไรด์ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการดูดซับฟลูออไรด์ลดลงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ เวลาสัมผัส, พีเอชของสารละลาย, ขนาดของวัสดุดูดซับ ที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์และความสามารถในการดูดซับของวัสดุจากไอโซเทอรัมของ Freundlich และ Langmuir จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์และของเสี่ยจากการผลิตสารส้มเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาสัมผัสช่วง 24 ชั่วโมง และหลังจากนั้นการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าคงที่

5.1.2 บ็อกไซต์และของเสี่ยจากการผลิตสารส้มมีพฤติกรรมการดูดซับฟลูออไรด์สอดคล้องกับไอโซเทอรัมของ Langmuir

5.1.3 สารละลายที่มี pH ต่ำ ส่งผลทำให้การดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์และของเสี่ยจากการผลิตสารส้มมีค่าสูงขึ้น

5.1.4 บ็อกไซต์ที่มีขนาดเล็ก มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงกว่าขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษานำบ็อกไซต์ที่ใช้แล้วมาฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ได้ใหม่

5.2.2 ควรทดสอบที่ระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์อื่นๆ เพิ่มเติม

5.2.3 ควรมีการควบคุมเรื่องความขุ่นของของเสี่ยจากการผลิตสารส้มให้ดีเนื่องจากความขุ่นจะเป็นปัญหาอย่างมากในการทดลอง

5.2.4 ควรมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารจากน้ำบริโภครจริง ๆ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาจากน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์เท่านั้นหรือนำไปดูดซับสารอื่นๆต่อ

5.2.5 ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ควรศึกษาในสถานะที่แตกต่างกันมากขึ้นเช่น ความเร็วในการเขย่า อุณหภูมิ เป็นต้น เนื่องจากในสถานะเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับได้

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มงานทันตสาธารณสุขชุมชน กองทันตสาธารณสุข กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.(2541)
 .การใช้ฟลูออไรด์ระดับชุมชน. กรุงเทพฯ: องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
 ฉัตรภักดิ์ คงปิ่น. (2551). การศึกษาภาวะโรคและผลกระทบต่อสุขภาพจากฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค
 ต.แม่ปู้คา ต.บวค้ำ อ.สันกำแพง จ.เชียงใหม่. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
 มรรยาท เพ็ชรตรา. (2546). การลดฟลูออไรด์ในน้ำประปาบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์จาก
 กะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ ส.ม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.
 ศันสนี รัชชกุล. (ผู้บรรยาย). สถานการณ์ฟลูออไรด์ในน้ำของประเทศไทย. กลุ่มพัฒนาความ
 ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กระทรวงสาธารณสุข.
 ศันสนี รัชชกุล, วุฒิชัย ชุมพลกุล และ สุพจน์ ชำนาญไพโร. (2552). แผนที่ฟลูออไรด์. กลุ่มพัฒนา
 ความร่วมมือทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
 สุพจน์ ชำนาญไพโร. (4 กรกฎาคม 2550). รohnหน่วยบริการข้อมูลฟลูออไรด์สำหรับชุมชน. สืบค้น
 เมื่อ 22 กันยายน 2553, จาก 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.
 Ghorai S. and Pant K.K. (2004). Investigation on the column performance of fluoride adsorption
 by activated alumina in fixed-bed. *Chemical Engineering Journal*, 98, 165-173.
 Metcalf and Eddy, Inc. (2003). *Waste Water Engineering: Treatment and Reuse*. 4th ed. Mc
 Graw 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.
 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.
 Nigussie W., Zewge F. and Chandravanshi B.S. (2007) Removal of Excess fluoride from Water
 Using Waste Residual from Alum Manufacturing Process. *Journal of Hazardous*

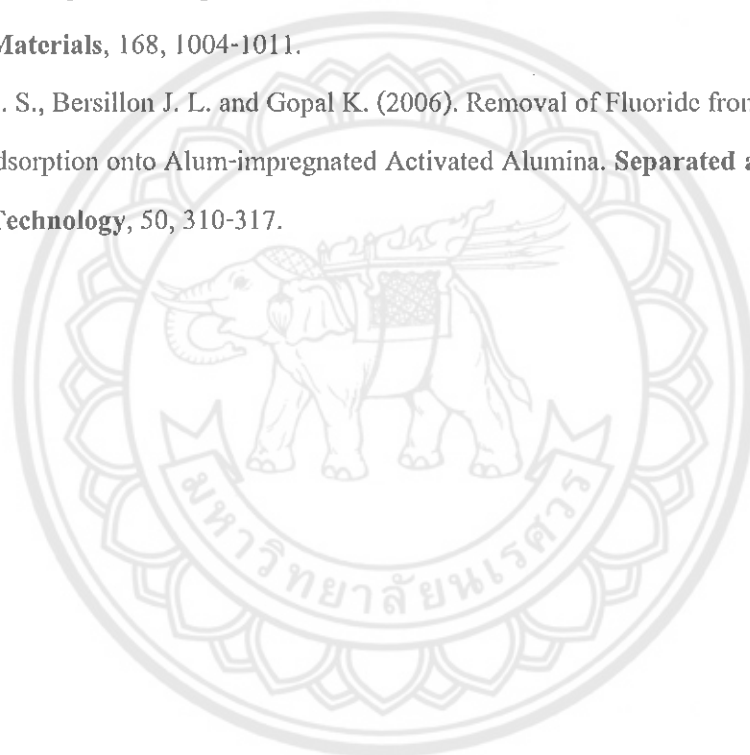
Materials, 147, 954-963.

Tang Y., Guan X., Su T., Gao N. and Wang J. (2009). Fluoride Adsorption onto Activated Alumina: Modeling the Effects of pH and Some Competing Ions. **Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 337, 33-38.

Tang Y., Guan X., Wang J., Gao N., McPhail M.R. and Chusuei C.C. (2009). Fluoride Adsorption onto Granular Ferric Hydroxide: Effects of Ionic Strength, pH, Surface Loading and Major Co-existing Anions. **Journal of Hazardous Materials**, 171, 774-779.

Teng S.X., Wang S.G., Gong W.X., Liu X.W. and Gao B.Y. (2009). **Journal of Hazardous Materials**, 168, 1004-1011.

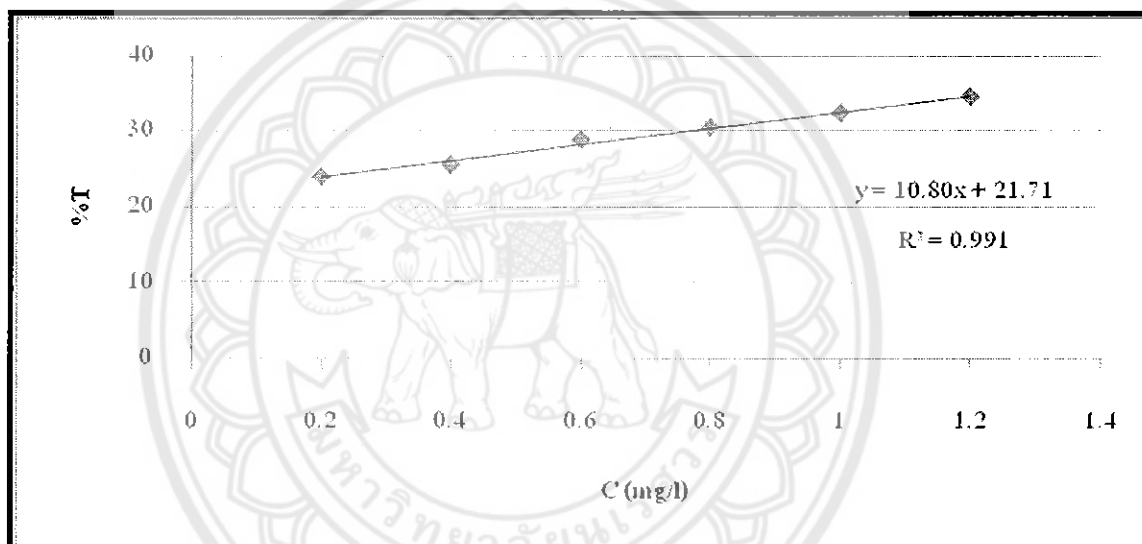
Tripathy S. S., Bersillon J. L. and Gopal K. (2006). Removal of Fluoride from Drinking Water by Adsorption onto Alum-impregnated Activated Alumina. **Separation and Purification Technology**, 50, 310-317.





ตารางที่ ก. 1 ผลการวิเคราะห์กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ฟลูออไรด์

ลำดับ	F (mg/l)	%T
1	0.2	23.9
2	0.4	25.5
3	0.6	28.8
4	0.8	30.5
5	1	32.4
6	1.2	34.55

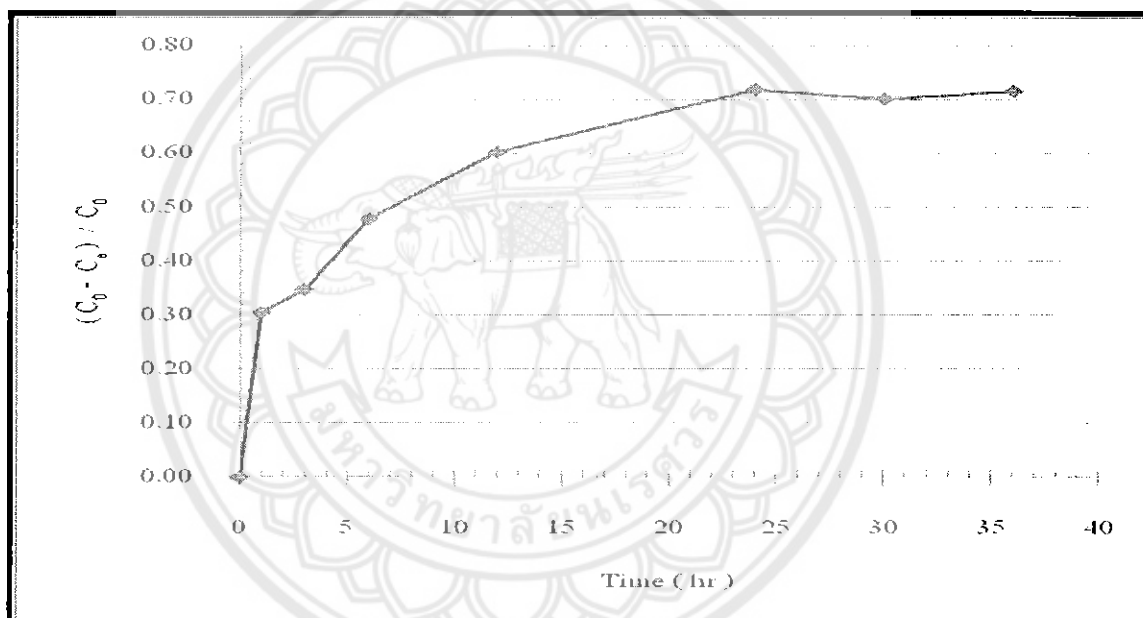


รูปที่ ก. 1 ผลการวิเคราะห์กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์



ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์

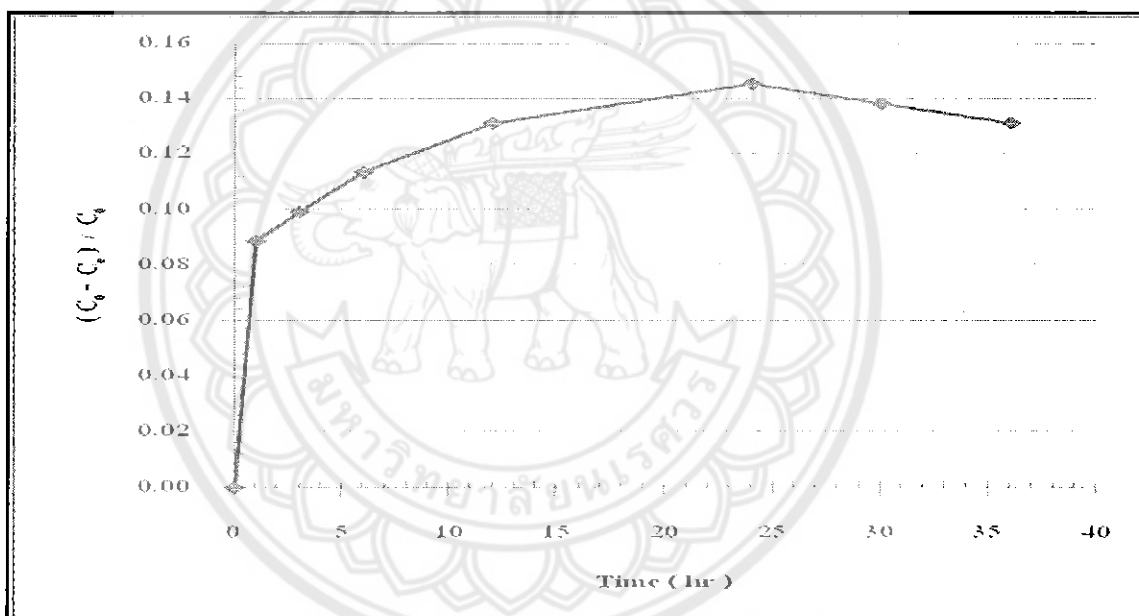
Time/hr	%T	c_0 (mg/l)	M(g)	F (mg/l)	$(C_0-C)/C_0$
1	31.50	6.53	4.00	4.54	0.30
3	30.90	6.53	4.00	4.26	0.35
6	29.05	6.53	4.00	3.40	0.48
12	27.30	6.53	4.00	2.59	0.60
24	25.65	6.53	4.00	1.83	0.72
30	25.90	6.53	4.00	1.94	0.70
36	25.70	6.53	4.00	1.85	0.72



รูปที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของบ็อกไซต์

ตารางที่ ข. 2 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของของเสียจากการผลิตสารส้ม

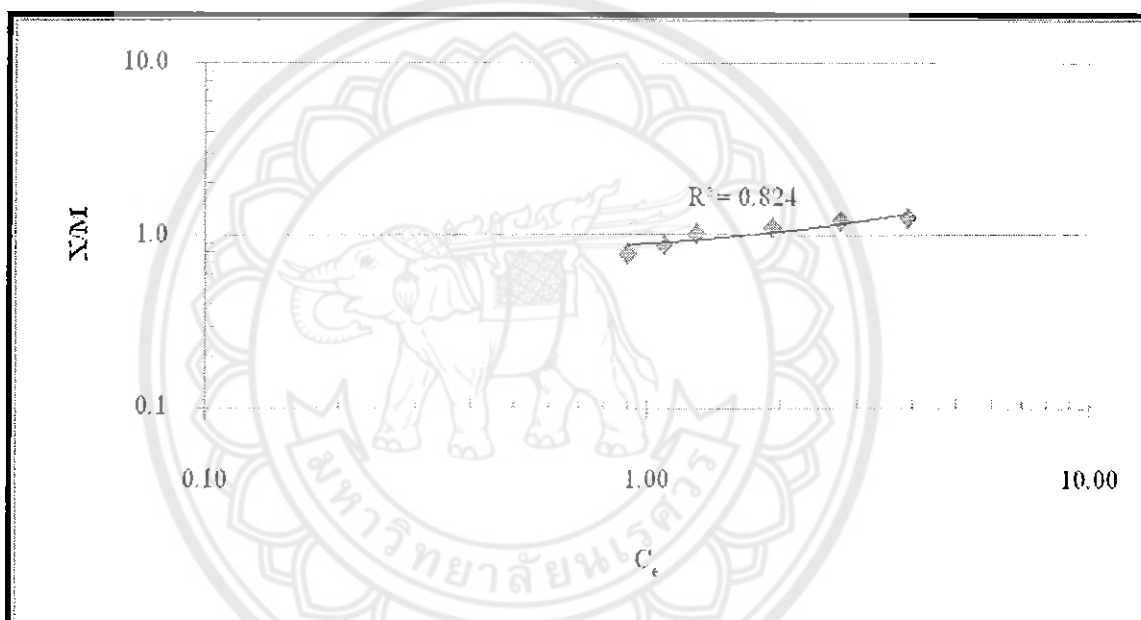
Time/hr	%T	c_0 (mg/l)	M(g)	F (mg/l)	$(C_0-C)/C_0$
1	34.55	6.53	4.00	5.95	0.09
3	34.40	6.53	4.00	5.88	0.10
6	34.20	6.53	4.00	5.79	0.11
12	33.95	6.53	4.00	5.67	0.13
24	33.75	6.53	4.00	5.58	0.15
30	33.85	6.53	4.00	5.63	0.14
36	33.95	6.53	4.00	5.67	0.13



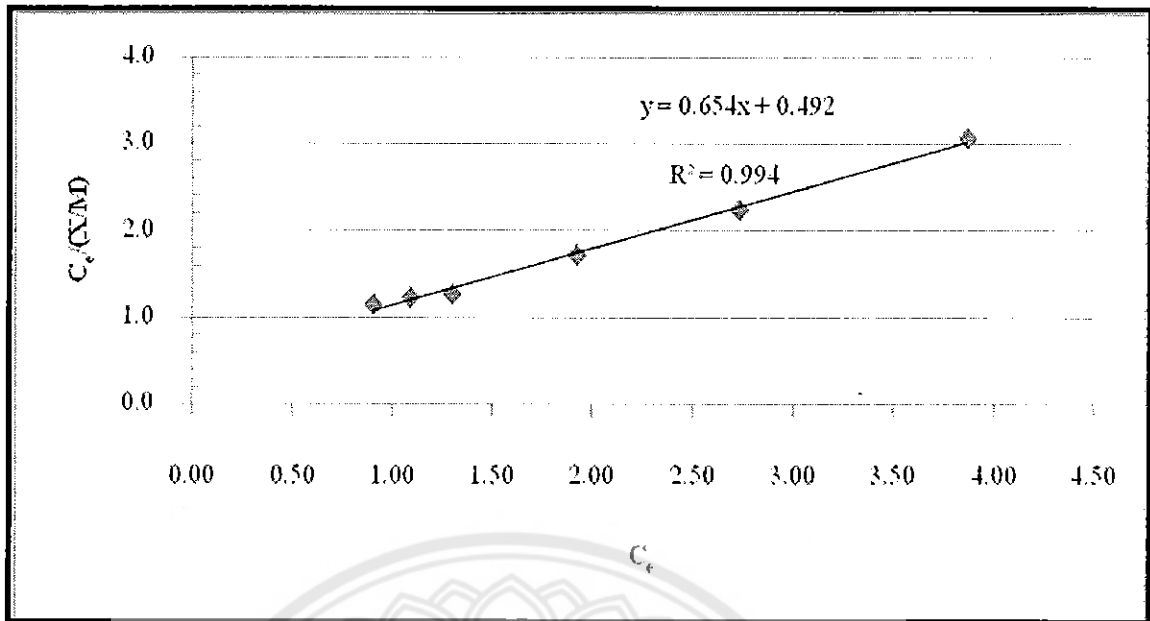
รูปที่ ข. 2 ผลการวิเคราะห์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของของเสียจากการผลิตสารส้ม

ตารางที่ ข. 3 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มของบ็อกไซต์

%T	M(g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$C_0 - C_e$	X/M	$C_e/(X/M)$
30.05	2.00	6.39	3.87	2.523	1.262	3.064
27.60	3.00	6.39	2.73	3.658	1.219	2.240
25.85	4.00	6.39	1.92	4.468	1.117	1.720
24.50	5.00	6.39	1.30	5.093	1.019	1.273
24.50	6.00	6.39	1.09	5.301	0.884	1.231
23.65	7.00	6.39	0.90	5.486	0.784	1.152



รูปที่ ข. 3 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของบ็อกไซต์



รูปที่ ข. 4 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของบ็อกไซต์

รายการคำนวณค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm

สมการ Langmuir Isotherm ของบ็อกไซต์คือ

$$\frac{C_e}{(X/M)} = 0.684 + 0.533C_e$$

ความชันของกราฟ (1/a) = 0.533

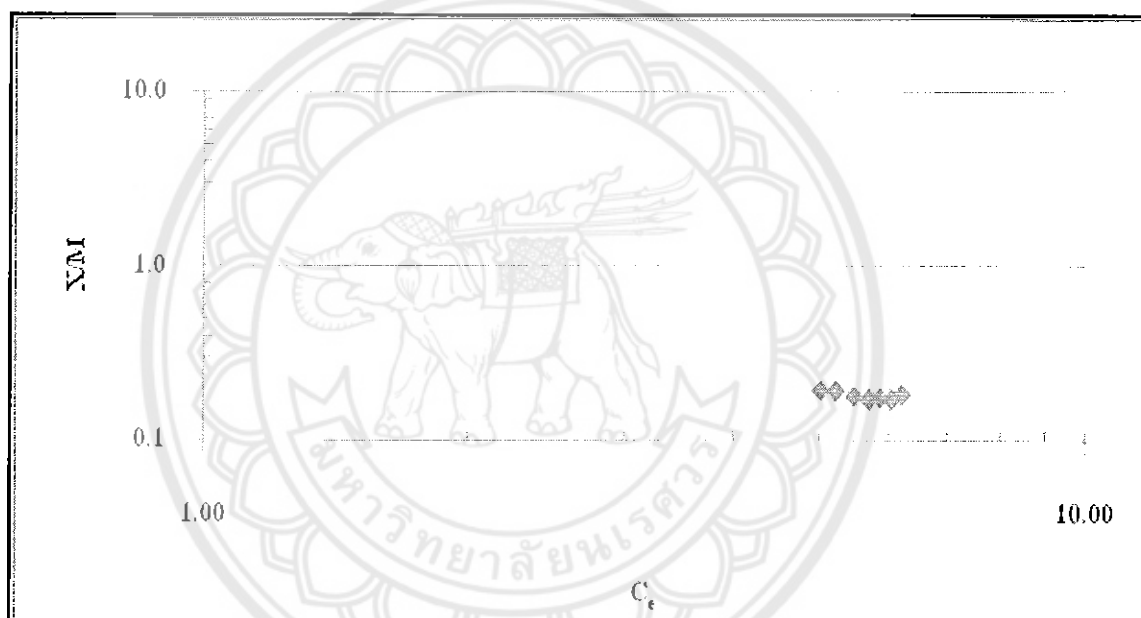
ดังนั้น a = 1.876

จุดตัดแกนมีค่า (1/ab) = 0.684

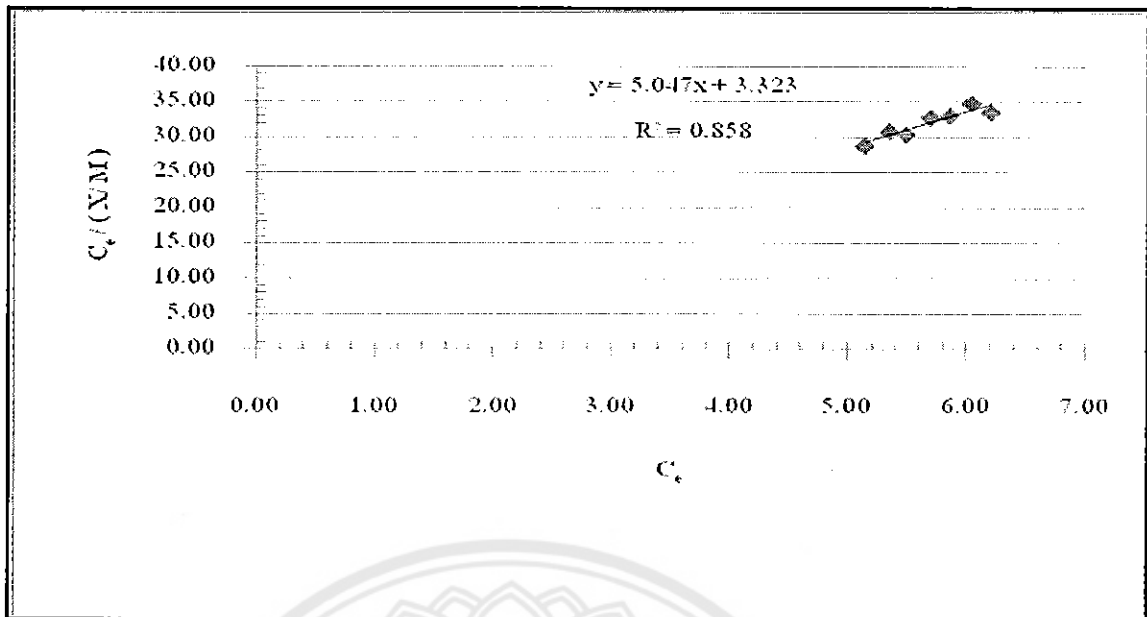
ดังนั้น b = 0.779

ตารางที่ ข. 4 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มของของเสียจากการผลิตสารส้ม

%T	M(g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$C_0 - C_e$	X/M	$C_e/(X/M)$
30.05	2.00	6.39	3.87	2.523	1.262	3.064
27.60	3.00	6.39	2.73	3.658	1.219	2.240
25.85	4.00	6.39	1.92	4.468	1.117	1.720
24.50	5.00	6.39	1.30	5.093	1.019	1.273
24.50	6.00	6.39	1.09	5.301	0.884	1.231
23.65	7.00	6.39	0.90	5.486	0.784	1.152



รูปที่ ข. 5 ผลการวิเคราะห์ Freundlich Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม



รูปที่ ข. 6 ผลการวิเคราะห์ Langmuir Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

รายการคำนวณค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm

สมการของ Langmuir Isotherm ของของเสียจากการผลิตสารส้มคือ

$$\frac{C_e}{(X/M)} = 3.232 + 5.047C_e$$

ความชันของกราฟ (1/a) = 5.047

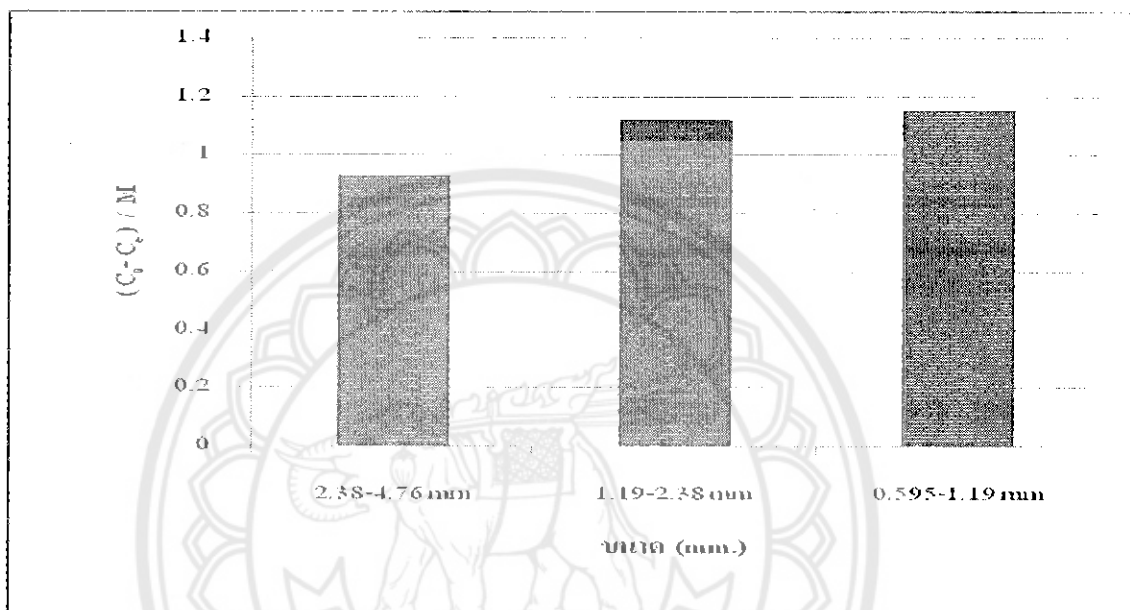
ดังนั้น a = 0.1981

จุดตัดแกนมีค่า (1/ab) = 3.232

ดังนั้น b = 1.5619

ตารางที่ ข. 5 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

ขนาด(mm.)	%T	M(g)	C_0 (mg/l)	C_t (mg/l)	$(C_0-C_t)/M$
0.42 – 1.19	25.05	4.00	6.16	1.551	0.0464
1.19 – 2.38	25.35	4.00	6.16	1.690	0.0559
2.38 – 4.76	27.00	4.00	6.16	2.454	0.0577



รูปที่ ข. 7 ผลการวิเคราะห์ผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

ตารางที่ ข. 6 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

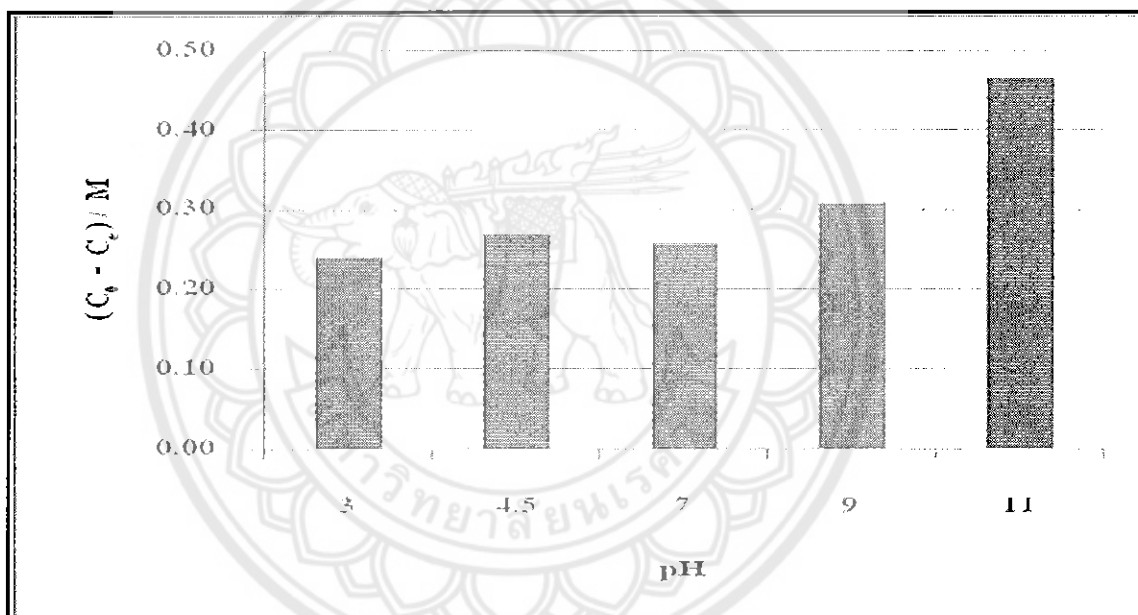
pH	M(g)	%T	C_0 (mg/l)	C_t (mg/l)	$(C_0 - C_t)/M$
3	4.00	24.00	6.16	1.065	0.0637
4.5	4.00	24.55	6.16	1.319	0.0606
7	4.00	27.10	6.16	2.500	0.0458
9	4.00	27.80	6.16	2.824	0.0418
11	4.00	29.25	6.16	3.495	0.0334



รูปที่ ข. 8 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของบ็อกไซต์

ตารางที่ ข. 7 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

pH	M(g)	%T	C_0 (mg/l)	C_t (mg/l)	$(C_0 - C_t)/M$
3	4.00	31.00	6.14	4.306	0.0232
4.5	4.00	32.35	6.14	4.931	0.0154
7	4.00	32.80	6.14	5.139	0.0128
9	4.00	32.70	6.14	5.093	0.0134
11	4.00	32.95	6.14	5.208	0.0120



รูปที่ ข. 9 ผลการวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของของเสียจากการผลิตสารส้ม

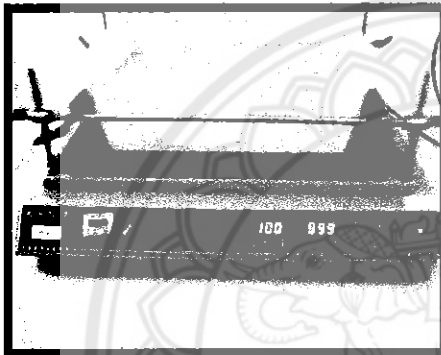




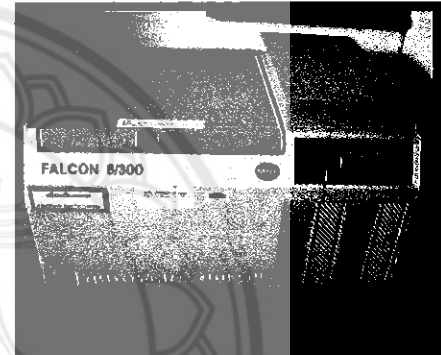
บ็อกไซต์



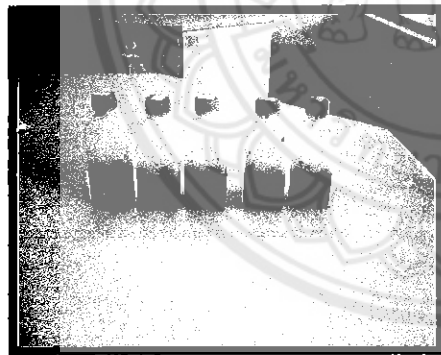
ของเสียจากการผลิตสารส้ม



เครื่องเขย่าแนวราบ



เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



ตัวอย่างสารละลาย



การวัดฟลูออไรด์

รูปที่ ค. 1 การเตรียมวัสดุคูดซับและการทดสอบ

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายคมสันต์ ตันหลง
 ภูมิลำเนา 27/1 หมู่ 1 ต. แม่พูล อ. ลับแล จ. อุตรดิตถ์
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนลับแลพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: aof_ck7@hotmail.com



ชื่อ นายจักรพงษ์ สุขาคำ
 ภูมิลำเนา 129 หมู่ 3 ต. แม่คำมี อ. เมืองแพร่ จ. แพร่
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนม่วงไข่พิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: becauselove_jane@hotmail.com