



การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาที่มีปฏิกิริยา
ในการทดสอบดูดซับแบบทีละเท

**FLUORIDE REMOVAL BY BONE CHAR AND ACTIVATED
ALUMINA IN BATCH ADSORPTION TEST**

นายกนกนิล จันตาเรียน รหัส 51382433
นายวิลาศ ปัญญาแก้ว รหัส 51384260

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2554

สมุดคณบดี	อาจารย์
ฉบับ..... 2.3 / พ.ศ. 2555.....	
เลขทะเบียน..... 16052964.....	
เลขเรียกหนังสือ.....	ฟร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๓๖๕๓	



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาแก้มันต์
 ในการทดสอบชุดชั้นแบบทีละเท

ผู้ดำเนินโครงการ นายกนกนิม จันทาเรือน รหัส 51382433
 นายวิลาศ ปัญญาแก้ว รหัส 51384260

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ชัชวัฒน์ โพร้ทอง

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
 ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

.....ที่ปรึกษาโครงการ
 (อาจารย์ชัชวัฒน์ โพร้ทอง)

.....กรรมการ
 (อาจารย์อำพล เตโชวานิชย์)

.....กรรมการ
 (อาจารย์วราภรณ์ กัญจน์ ช่อนกลิ่น)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์ ในการทดสอบดูดซับแบบทีละเท		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกนกภิญญ	จินดาเรียน	รหัส 51382433
	นายวิลาศ	ปัญญาแก้ว	รหัส 51384260
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชัยวัฒน์ โปธ์ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์ ในการทดสอบการดูดซับแบบทีละเท ศึกษาผลของเวลาสัมผัส พีเอช และขนาดต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ ถ่านกระดูกสุกที่ใช้ได้จากการเผาในห้องปฏิบัติการ และอะลูมินากัมมันต์ที่ใช้ได้จากบริษัทไนโซ จำกัด จากการศึกษา พบว่า ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์มีค่าเป็น 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการทดสอบไอโซเทิร์มพบว่า ถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์สอดคล้องกับไอโซเทิร์มของ Freundlich จากการศึกษาผลของพีเอช พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์จะมีค่าสูงในสารละลายที่มีพีเอชต่ำ นอกจากนั้นยังพบว่า ถ่านกระดูกที่มีขนาดเล็กทำให้การดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้น

Project title Fluoride Removal by Bone Char and Activated Alumina
in Batch Adsorption Test

Name Mr. Kanoksin Jantarein ID. 51382433
Mr. Wilad Panyakaew ID 51384260

Project advisor Mr. Chaiwat Photong

Major Environmental Engineering

Department Civil Engineering

Academic year 2011

.....

Abstract

This research aims to study the water defluoridation by activated alumina and bone char in batch adsorption test and study the influence of contact time, pH and grain size on the fluoride removal efficiency. The pig bone char was burned in laboratory and activated alumina obtained from Nicho company limited. The study shows that the equilibrium time of bone char and activated alumina were 12 and 24 hr, respectively. The isotherm test found that activated alumina and bone char were corresponding with Freundlich isotherm. The lower pH of solution resulted in improved fluoride removal efficiency of both adsorbents. It was also found that the smaller size of bone char resulted in improved fluoride removal efficiency.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ชัยวัฒน์ โพร้ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและผู้มีพระคุณซึ่งสนับสนุนในด้าน
การเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายกนกนิณ จันตาเรียน

นายวิลาศ ปัญญาแก้ว

มีนาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	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 ถ่านกระดูก (Bone char).....	21
2.6 อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina).....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	27
3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	27
3.2 การเตรียมวัสดุคูดซั้ว.....	29
3.3 การเตรียมกราฟมาตรฐาน.....	30
3.4 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการคูดซั้วฟลูออไรด์.....	32
3.5 การศึกษาหาไอโซเทิร์มของวัสดุคูดซั้ว.....	32
3.6 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการคูดซั้วฟลูออไรด์.....	33
3.7 การศึกษาขนาดของวัสดุคูดซั้วต่อการคูดซั้วฟลูออไรด์.....	33
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	34
4.1 ผลการศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการคูดซั้วฟลูออไรด์.....	34
4.2 ผลการทดสอบการศึกษาหา ไอโซเทิร์มของถ่านกระดูกและอะลูมิน่ากัมมันต์.....	36
4.3 ผลการศึกษา pH ของสารละลายที่เหมาะสมต่อการคูดซั้วฟลูออไรด์.....	39
4.4 การศึกษาผลของขนาดถ่านกระดูกต่อการคูดซั้วฟลูออไรด์.....	42
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	46
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ.....	48
ภาคผนวก ค ภาพถ่ายในการทดลอง.....	57

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 สมบัติของอะลูมินาแกมมันต์จากบริษัท ไนโซ จำกัด.....	23
2.6 องค์ประกอบของกากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากคาโอลิน.....	24
4.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์.....	35
4.2 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของถ่านกระดูก.....	37
4.3 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของอะลูมินาแกมมันต์.....	38
4.4 ผลการทดสอบผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์.....	39
4.5 ผลการทดสอบขนาดของถ่านกระดูกต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	43
ก.1 ผลการทดสอบการทำกราฟมาตรฐาน(Calibration curve)ฟลูออไรด์.....	49
ข.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูก.....	51
ข.2 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของของอะลูมินาแกมมันต์.....	52
ข.3 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของถ่านกระดูก.....	53
ข.4 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของอะลูมินาแกมมันต์.....	54
ข.5 ผลการทดสอบขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก.....	56
ข.6 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก.....	57
ข.7 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของอะลูมินาแกมมันต์.....	58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพ.....	6
2.2 แผนที่แสดงแหล่งน้ำบาดาลที่ไม่ปลอดภัยของประเทศ.....	11
2.3 แผนภาพการไหลของออสโมซิส.....	13
2.4 Electrodialysis Stack.....	14
2.5 เครื่องกรองถ่านกระดูกในครัวเรือน.....	16
2.6 ลักษณะการดูดซับสารอินทรีย์ของ Activated carbon.....	17
2.7 ถ่านกระดูกสุก.....	21
2.8 อะลูมินากัมมันต์.....	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	27
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	29
3.3 กระดูกสุกก่อนเผาและหลังเผา.....	30
3.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน.....	31
4.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูก.....	35
4.2 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของอะลูมินากัมมันต์.....	35
4.3 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของถ่านกระดูก.....	37
4.4 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของถ่านกระดูก.....	37
4.5 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์.....	38
4.6 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์.....	38
4.7 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อกับดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก.....	40
4.8 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อกับดูดซับฟลูออไรด์ของอะลูมินากัมมันต์.....	40
4.9 ผลทดสอบ pH ของสารละลายต่อกับดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์.....	41
4.10 ผลการทดสอบขนาดของถ่านกระดูกและที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟลูออไรด์.....	42
ก.1 กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์.....	49
ข.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูก.....	51
ข.2 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของอะลูมินากัมมันต์.....	52

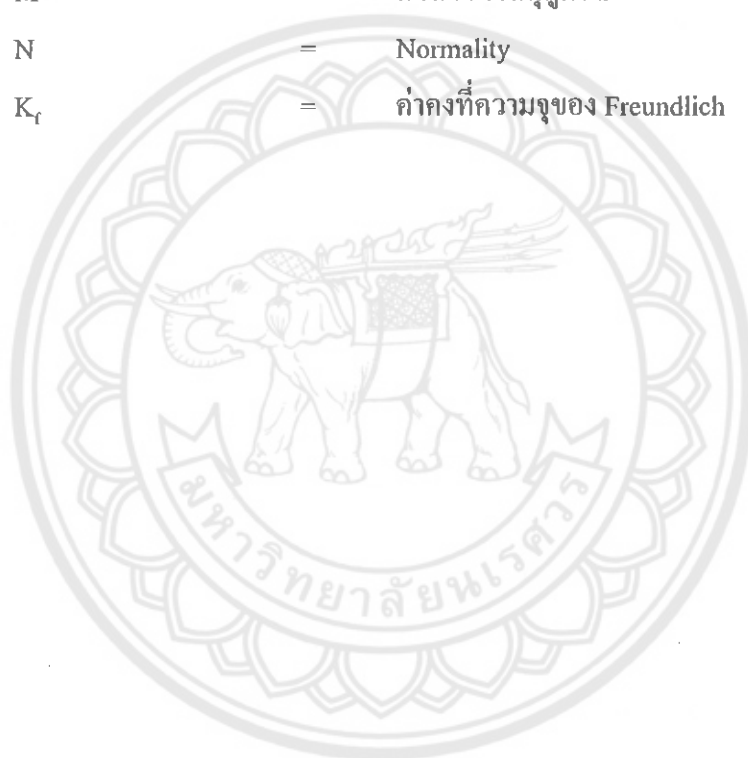
สารบัญรูป (ต่อ)

ข.3 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของถ่านกระดูก.....	53
ข.4 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของถ่านกระดูก.....	53
ข.5 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์.....	54
ข.6 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์.....	55
ข.7 ผลการทดสอบผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก.....	56
ข.8 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก.....	57
ข.9 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของอะลูมินากัมมันต์.....	58
ค.1 การเตรียมวัสดุดูดซับและการทดสอบ.....	60



สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

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
K_f	=	ค่าคงที่ความจุของ Freundlich



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 อะลูมินากัมมันต์ ถ่านกระดูก หรือ ซีโอไลต์ รวมทั้งวัสดุดูดซับที่มีราคาถูกอื่นๆ ก็สามารถกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำได้เช่นกัน นับเป็นทางเลือกที่ดีและประหยัดอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ

อะลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina) เป็นวัสดุที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดที่มีความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ และนิยมใช้ในปัจจุบัน ส่วนถ่านกระดูก (Bonechar) เป็นวัสดุที่สามารถเตรียมได้ง่ายและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น มีความแข็งแรงแต่เปราะ โครงสร้างภายในมีรูพรุนและเป็นโพรงอยู่ด้านในทำให้มีสมบัติในการดูดซับได้ดี ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ในการนำมาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำ จึงเป็นที่มาของการวิจัยครั้งนี้ คือ เพื่อศึกษาแนวทางในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยกระบวนการดูดซับและอะลูมินากัมมันต์ ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำได้

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ
- เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์
- เพื่อศึกษาปัจจัยและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ได้แก่ เวลา พีเอช และขนาดของวัสดุดูดซับ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์
- สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับน้ำธรรมชาติ
- สามารถนำไปศึกษาต่อและนำไปใช้ประโยชน์ทางการกำจัดฟลูออไรด์ได้
- เพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำสำหรับบ้านเรือนและโรงงาน

อุตสาหกรรม

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์
- ศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัม/ลิตร
- ศึกษาผลของเวลาสัมผัส ไอโซเทิร์มของการดูดซับ พีเอช และขนาดของวัสดุของวัสดุดูดซับต่อการกำจัดฟลูออไรด์
- ทดลองการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวิธี Batch Test

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษากำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์ด้วยกระบวนการดูดซับ ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับของฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์ในการทดสอบแบบทีละเท ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบหาเวลาสัมผัส ทดสอบหาไอโซเทิร์มของการดูดซับ ทดสอบหาผลขนาดต่อการดูดซับ 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.
ศึกษาและเตรียมวัสดุคูดซับ						
ทดสอบการคูดซับแบบที่ละเท						
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 (Fluorspar), ครายโอไลท์ (Cryolite), อพาไทท์ (Apatite), ไมก้า (Mica), ฮอร์นเบลนด์ (Hornblende), และเพ็กมาไตท์ (Pegmatite) เช่น โทปาซ (Topaz), ทอร์มาลีน (Tourmaline) เป็นต้น นอกจากนั้นยังพบในบรรยากาศซึ่งมีที่มาจากฝุ่นละอองในบรรยากาศจากการทำเหมืองและการเผาไหม้ หรือในรูปของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซฟลูออรีน ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ จากอุตสาหกรรมต่างๆ นอกจากนั้นยังพบได้ในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินซึ่งเกิดจากสัมผัสกับหินและแร่ในบริเวณนั้น

น้ำทุกแหล่งน้ำจึงมีฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ลักษณะทางภูมิศาสตร์ เคมีของแหล่งน้ำ องค์ประกอบของดินและหิน ความลึก ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินจึงมีค่าแตกต่างกัน ตั้งแต่ต่ำกว่า 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 ยามอนด์โซเดียมฟลูออไรด์ 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 nut (supari)	3.8-12.0
Apple	5.7	Beetle leaf (pan)	7.8-12.0
Guava	5.1	Tobacco	3.2-38

2.1.2 ประโยชน์และโทษของฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อกระดูกและฟัน ฟลูออไรด์ในระดับที่เหมาะสมระหว่าง 0.5-1.0 มก./ล. จะสามารถป้องกันฟันผุได้ ฟลูออไรด์ที่เข้าไปในร่างกายจะสะสมที่กระดูกและฟัน โดยจะเข้าไปรวมตัวกับสารประกอบของฟันและกระดูก ทำให้แข็งแรงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะทำให้ฟันมีความทนทานต่อการละลายตัวเนื่องจากกรดที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อจุลินทรีย์และน้ำตาลทำให้เกิดฟันผุน้อยลงถ้าดื่มน้ำที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์เหมาะสมประมาณ 1 มก./ล. เป็นประจำในระยะที่ฟันกำลังเจริญเติบโต ฟลูออไรด์จะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของฟัน โดยเปลี่ยนผลึกของแร่ประกอบหลักของเคลือบฟัน 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 ฟลูออไรด์จะเข้ารวมกับสารประกอบของฟันได้ 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 และเม็ดโลหิต นอกจากนี้ยังพบว่าในพื้นที่ที่ประชากรได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป เด็กๆ จะมีระดับของไอคิวโดยเฉลี่ยต่ำกว่าชุมชนที่มีฟลูออไรด์ต่ำ



(ก) Dental Fluorosis



(ข) Skeleton Fluorosis

รูปที่ 2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพ

การเป็นพิษ เนื่องจากฟลูออไรด์เป็นได้ใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การเป็นพิษชนิดเฉียบพลัน และการเป็นพิษชนิดเรื้อรัง 1) การเป็นพิษชนิดเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับฟลูออไรด์ปริมาณสูงในครั้งเดียว อาการเป็นพิษจะรุนแรงเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณของฟลูออไรด์ที่รับประทาน และน้ำหนักตัวของผู้ป่วย ซึ่งจะแสดงอาการตามลำดับ ความรุนแรงตั้งแต่ คลื่นไส้ อาเจียน น้ำลายไหลมาก และมีอาการปวดท้องมาก อาจมีอันตรายถึงชีวิตได้ ขณะที่ค่า Certainly lethal dose (CLD) หมายถึง ขนาดของฟลูออไรด์ ที่ทำให้เกิดพิษอย่างเฉียบพลัน จนถึงเสียชีวิตได้ ค่า CLD นี้ โดยทั่วไปจะเท่ากับ 50 มก. ฟลูออไรด์/น้ำหนักตัว 1 กก. 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 จะมีความผิดปกติเกิดขึ้น ความผิดปกติที่เห็นได้เป็นครั้งแรก ได้แก่การเกิดความผิดปกติกับผิวเคลือบฟันของฟันแท้ที่เรียกว่าฟันตกกระ (Dental fluorosis) ฟันตกกระส่วนใหญ่เกิดในฟันแท้ เนื่องจากฟันน้ำนมสร้างขณะอยู่ในครรภ์มารดา และฟลูออไรด์ไม่สามารถซึมผ่านรกไปยังทารกในครรภ์ได้ ฟันตกกระ ไม่ใช่โรค แต่เป็นสภาวะการเจริญพร่องของเคลือบฟัน ซึ่งเกิดจากการได้รับ ฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปปริมาณที่เหมาะสม แล้วไปรบกวนกระบวนการสร้างแร่ธาตุที่เคลือบฟันใน ระยะที่มีการสร้างฟันและฟันเจริญเติบโตอยู่ในกระดูกขากรรไกร ทำให้เคลือบฟันมีสีขาวขุ่น บางส่วนหรือทั้งซี่ ตามระดับความรุนแรงของสภาวะฟันตกกระ ความรุนแรงจะขึ้นกับปริมาณของ ฟลูออไรด์ที่ได้รับ ซึ่งมีได้ตั้งแต่แทบจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ หรือพบผิดปกติเล็กน้อย เป็นจุดขาวประปราย มีเส้นขาวบาง ๆ หรือเป็นหย่อมขาว ๆ ใกล้เคียง ปลายหน้าตัดของฟันหน้า หรือยอด แผลของฟันหลังเหมือนหิมะปกคลุมยอดเขาที่ค่อย ๆ บางลง กลืนไปกับเคลือบฟันรอบ ๆ หรือ ผิดปกติรุนแรง ที่มีหลุมตามขวางเคลือบฟันเป็นสีน้ำตาล มักเห็นชัดเจนในฟันหน้าและฟันกราม น้อย บางครั้งเคลือบฟันที่ตกกระ แดกออกจนเห็นสีเหลืองของเนื้อฟัน สภาวะฟันตกกระ มักเกิดกับ ฟันซี่เดียวกันทั้งสองฟากของขากรรไกรเพราะมีการสร้างและเจริญเติบโตในระยะเดียวกัน พบมากใน ฟันกรามน้อย และฟันกรามซี่ที่ 2 รองลงมาคือฟันตัดหน้าบน ส่วนฟันตัดหน้าล่าง มีโอกาสเกิดน้อย ที่สุด สภาวะฟันตกกระนี้เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างถาวร เมื่อเกิดขึ้นแล้วไม่มีทางกลับคืนสู่ สภาวะปกติได้

● ผลกระทบต่อกระดูก ในผู้ที่ดื่มน้ำที่มีฟลูออไรด์สูงมากติดต่อกันเป็นเวลาตั้งแต่ 10 ปี ขึ้นไปไม่ว่าในช่วงใดของอายุ จะเกิดความผิดปกติของกระดูกเกิดขึ้น พิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกนี้ อาจเกิดมากน้อยได้ตั้งแต่ไม่มีอาการภายนอกใดๆ นอกจากอาการปวดตามข้อเล็กๆ เช่น มือ เท้า เข้า ไปจนถึงปวดหลัง แต่จะพบความผิดปกติได้จากภาพถ่ายทางรังสี ที่กระดูกมีความทึบแสงและหนา กว่าปกติไปจนถึงผู้ที่เป็นมากจนพบว่ามีอาการจับตัวของ แคลเซียมตามเส้นเอ็น และข้อต่อเกิดกระดูก งอก และกระดูกเชื่อมติดกันข้อต่อต่างๆจนทำให้เป็นปัญหาในการเคลื่อนไหว ที่เรียกกันว่า Crippling skeletal fluorosis ถ้าเอากระดูกของคนที่มีสภาวะฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูกมาดูจะเห็น ว่ากระดูกเหล่านี้จะหนัก มีสีขุ่น ไม่เรียบมีกระดูกงอกขรุขระซึ่งความขรุขระของกระดูกเหล่านี้ช่วย ในการวินิจฉัยแยกสภาวะฟลูออไรด์เป็นพิษต่อกระดูก ออกจากสาเหตุอื่นๆที่ทำให้เกิดกระดูกหนา ทึบได้ เนื่องจากการเกิดพิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกในระยะแรกๆ จะมีอาการเพียงการปวดตามข้อ ไปจนถึงปวดหลัง การวินิจฉัยทำได้ยาก การรักษาจึงมักเป็นการให้ยาแก้ปวด จากรายงานใน ประเทศไทย พบว่าในบริเวณที่มีฟลูออไรด์สูงจะมีอัตราการให้ยาแก้ปวดสูงกว่าในพื้นที่อื่นๆ ทำให้ เกิดอันตรายจากผลข้างเคียงของการให้ยาแก้ปวดสูงตามไปด้วย (คันสนธิ และคณะ, 2552)

2.1.3 มาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม

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

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค

มาตรฐาน/ค่าแนะนำ	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)	
	เกณฑ์กำหนดสูงสุด	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
มาตรฐานน้ำดื่มการประปานครหลวง	0.7	1.0
มาตรฐานน้ำบริโภคประเภทที่ 1 มอก. 257/2549	0.7	-
มาตรฐานน้ำบริโภคประเภทที่ 2 มอก. 257/2549	0.7	1.0
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่บริโภค	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.) ส่งผลให้เกิดฟันตกกระในพื้นที่ที่มีลักษณะชาวชนบางส่วนหรือทั้งหมู่บ้านจนถึงเป็นสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆ 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 ประชาชนจึงได้รับสารฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายใน

ระดับสูงกว่ามาตรฐานถึงขั้นที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ แม้ในน้ำดื่มบรรจุขวดก็พบว่ามี ฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง (จุมพล, 2540)

รายงานผลการสำรวจปริมาณฟลูออไรด์ของผ่านทันตสาธารณสุข สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2527 จากการเก็บตัวอย่างน้ำจาก 1,084 บ่อทั่วจังหวัดเชียงใหม่ ใน 7 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง, ดอกสะเก็ด, ฟาง, จอมทอง, หางดง, คอยเต่า, และสารภี พบว่ามีปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบ่อซึ่งประชาชนใช้ในการบริโภคสูงเกินกว่า 1.2 มก./ล. จำนวนกว่าร้อยละ 6.8 และบ่อที่พบความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงกว่า 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 น้ำบ่อบ้านใหม่หมอกจ้าม ตำบลท่าตอน อำเภอแม่เฒ่า ขณะที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน มีปริมาณฟลูออไรด์ระหว่าง 0.10-27.1 มก./ล. และพบว่ามีปริมาณฟลูออไรด์สูงเกินมาตรฐาน คือ ร้อยละ 32.0 ซึ่งฟลูออไรด์สูงสุด คือ น้ำพุร้อน เมืองเป่ง บ้านใหม่คอนตัน ตำบลเมืองเป่ง อำเภอปาย (สุพจน์, 2550)

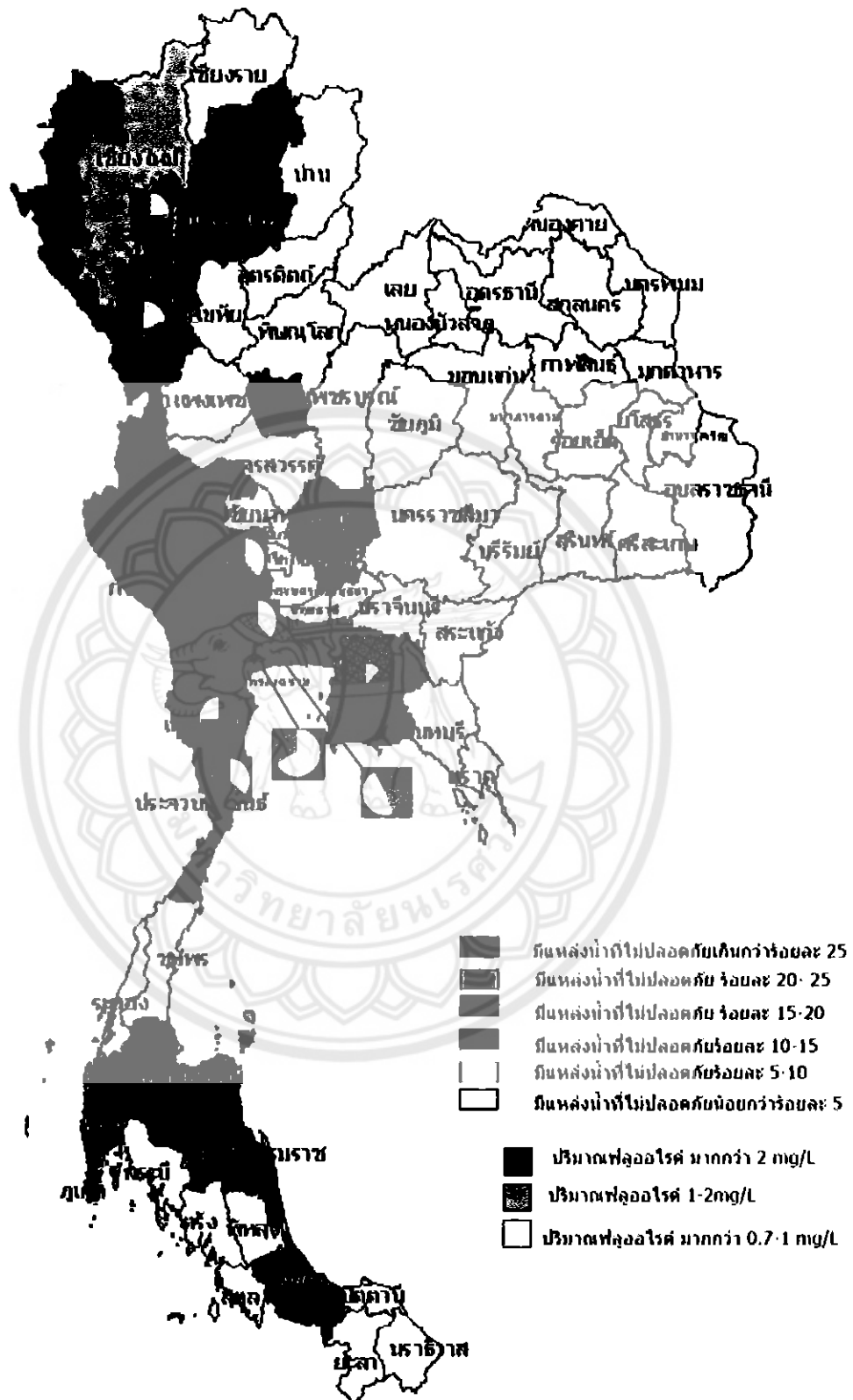
จากการเก็บตัวอย่างน้ำจากครัวเรือนทั้งหมด 860 ครัวเรือน ทั้งน้ำที่ใช้ทำอาหารและ น้ำที่ใช้ดื่ม ได้รับตัวอย่างน้ำที่มีผลลาคกรบถ้วนสมบูรณ์ทั้งสิ้น 728 ตัวอย่าง พบว่าน้ำ บริโภคที่ใช้สำหรับดื่มส่วนใหญ่ จำนวน 370 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 50.82 มี ฟลูออไรด์เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.7 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนที่เหลือจำนวน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

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

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.ดู่	4.30



รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงแหล่งน้ำบาดาลที่ไม่ปลอดภัยของประเทศ (คั่นสนธิ และคณะ, 2552)

2.3 การกำจัดฟลูออไรด์

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

2.3.1 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

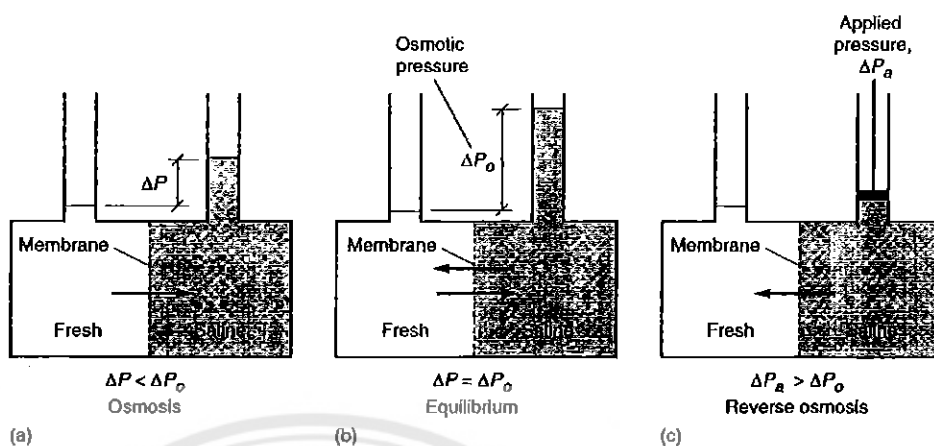
โดยทั่วไปกระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ (1) เมมเบรนที่ขับเคลื่อนด้วยความดัน (Pressure-Driven Membrane) ประกอบด้วย Microfiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) และ Reverse Osmosis (RO) และ (2) เมมเบรนที่ขับเคลื่อนด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electrical Voltage-Driven 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 สามารถแยกตัวทำละลายออกจากสารละลาย โดยอาศัยแรงดันที่มีค่ามากกว่าแรงดันออสโมติก ระหว่าง 125-1,200 ปอนด์/ตร.นิ้ว (Osmotic Pressure) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การผลิตน้ำจืดจากน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม การกำจัดธาตุอาหารต่างๆ ในน้ำ การกำจัดสารกัมมันตภาพรังสี หรือกำจัดสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่เป็นอันตรายบางชนิดออกจากน้ำ เป็นต้น

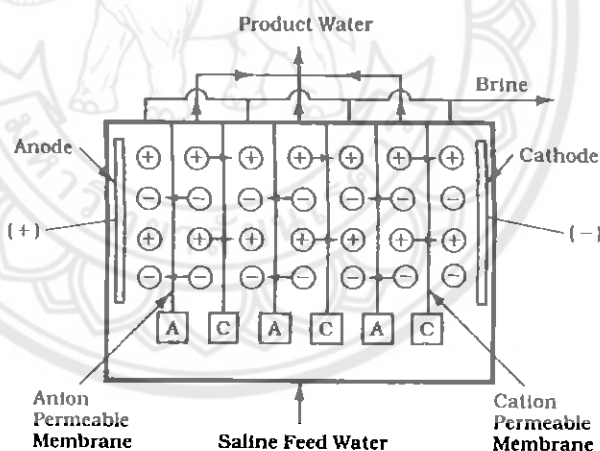
ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับ ชนิดของเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย ลักษณะของอออนที่ต้องการแยกออก สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ เช่น พีเอชและอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงมาก อาจจำเป็นต้องมีระบบกำจัดสารแขวนลอยในน้ำออกก่อนป้อนเข้าระบบเพื่อป้องกันการอุดตันของเยื่อเลือกผ่าน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

อย่างไรก็ตาม ระบบเมมเบรนจำเป็นต้องอาศัยพลังที่ต้องใส่เข้าไปในรูปของความดันเพื่อเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของน้ำให้ไหลผ่านเมมเบรนไปได้ ยิ่งระบบที่มีขีดความสามารถในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก ได้ก็จำเป็นต้องอาศัยเมมเบรนที่มีรูขนาดเล็ก และจำเป็นต้องอาศัยความดันที่สูงมาก โดยทั่วไปกระบวนการออสโมซิสแบบย้อนกลับ มักต้องการพลังงานจากเครื่องสูบน้ำแรงดันสูงน้ำเพื่ออัดความดันให้แก่ระบบ โดยปกติต้องการพลังงานประมาณ 2.4-4.8 กิโลวัตต์.ชม./ลบ.ชม.

▪ กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)

Electrodialysis เป็นกระบวนการเมมเบรนที่อาศัยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและเยื่อเมมเบรนเพื่อแยกไอออนออกจากของเหลว ไอออนบวกและไอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรนซึ่งถูกวางระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้กับอิเล็กโทรดให้เกิดการไหลของกระแสตรง ส่งผลให้อิออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ (Cathode) และไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก (Anode) การจัดเรียงเมมเบรนสลับกันให้เกิดเป็นช่องตรงกลาง เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการแยกเป็นช่องที่เป็นสารละลายที่เจือจางหรือปราศจากไอออน และช่องที่มีไอออนบวกและลบละลายอยู่เข้มข้น ดังรูปที่ 2.4

โดยทั่วไประบบประกอบด้วยเมมเบรนที่ขอมให้อิออนบวกและลบผ่านได้ และช่องว่าง (Spacer) ซึ่งมักเรียกรวมกันว่า Cell Pairs วางในแนวตั้งระหว่างอิเล็กโทรด น้ำเข้าจะถูกปั๊มด้วยความดันประมาณ 50 ปอนด์/ตร.นิ้ว ไอออนจะถูกกำจัดออกจากน้ำและผลิตน้ำที่ปราศจากไอออนออกมา อย่างไรก็ตามระบบ Electrodialysis ไม่สามารถกำจัดไอออนที่เป็นกลาง เช่น ซิลิกา และอนุภาคที่เป็นกลางอื่นๆ ได้ เนื่องจากน้ำที่ผลิตได้ไม่ใช่เป็นน้ำที่กรองผ่านเมมเบรน แต่เป็นน้ำที่แยกไอออนออกโดยให้อิออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไป ทำให้อิออนที่เป็นกลางยังคงอยู่ในน้ำ ไม่เคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.4 Electrodialysis Stack (Reynolds and Richards, 1996)

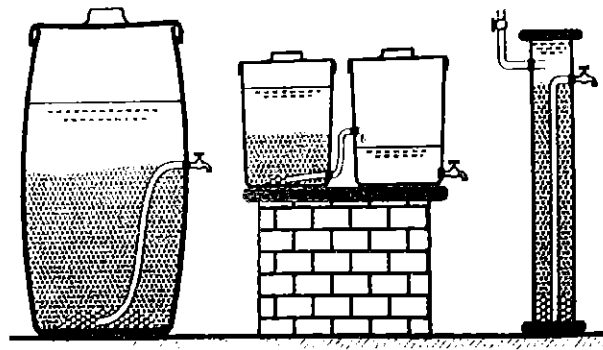
การทำงานของระบบจะขึ้นอยู่กับ กระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายแก่ระบบ อัตราการไหลของน้ำเสีย จำนวนเซลล์ที่ใช้ และความเข้มข้นของสารละลาย หากอัตราส่วนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density, CD) ต่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากเกินไป ซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าในระบบมากหรือความเข้มข้นของสารละลายน้อยเกินไป ทำให้เกิดแนวโน้มการตกผลึกบริเวณผิวของเยื่อกรอง 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. จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากรน้ำดื่ม โดยเฉพาะวัสดุบางชนิดที่สามารถทำงานได้ดีเฉพาะสภาวะที่ pH ต่ำมากๆ เช่น Activated carbon ซึ่งสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ pH ต่ำกว่า 3 (Tripathy et al., 2006) ขณะที่ Activated alumina เป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ได้ดี ความสามารถในการกำจัดขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะของผลึก (Crystalline form) และ pH ของสารละลาย รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ เช่น กระบวนการ Activation และความเป็นด่าง (Alkalinity) (Tripathy et al., 2006)

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



รูปที่ 2.5 เครื่องกรองถ่านกระตุ้นในครัวเรือน

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

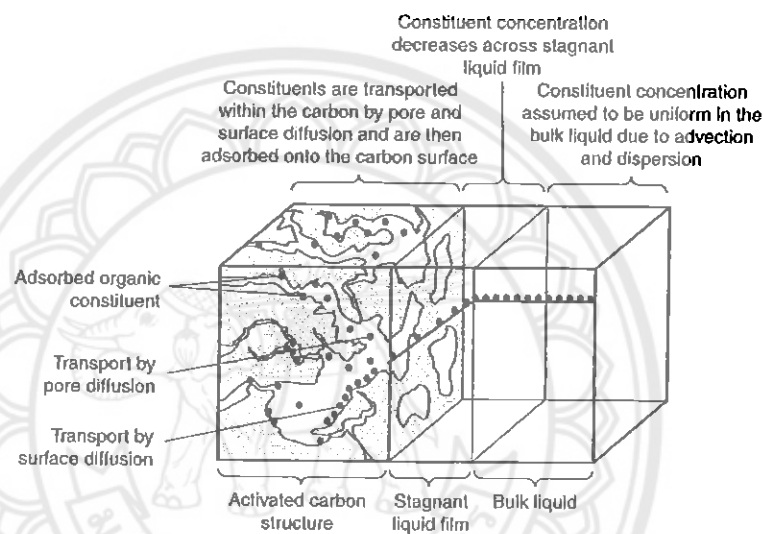
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กลกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการสะสมของสารในสารละลายบนพื้นผิวที่เหมาะสมหรือกระบวนการเคลื่อนย้ายสารในสถานะของเหลว (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 ถ่านกระตุ้นด้วยไอน้ำ ถ่านมะพร้าว หรือเมล็ดของผลไม้บางชนิด โดยอาศัยพลังงานความร้อน มีทั้งแบบเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) และแบบผง (Power Activated Carbon, PAC) มักใช้เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ สี กลิ่น รส คลอรีน หรือสารไฮโดรคาร์บอน เป็นส่วนใหญ่ รวมทั้ง โลหะหนัก ขณะที่ แคลเซียม, แมกนีเซียม, สารอินทรีย์, น้ำมันและไขมัน และของแข็งแขวนลอย มักส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

2.4.1 กลไกการดูดซับ

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



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

- การเคลื่อนที่ในสารละลาย (Bulk Solution Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ที่จะถูกดูดซับผ่านของเหลว เข้าสู่เขตฟิล์มตรึง (Fix Film) ของของเหลวที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ ซึ่งเกิดจากการพา (Advection) และการแพร่ (Dispersion) เป็นหลัก
- การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านชั้นฟิล์มของเหลวหนึ่งที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ (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 ปริมาณไอออนที่ดูดซับของมวลตัวที่จุดสมดุล (mg/g)
	q_{\max}	คือ ค่าคงที่ของ Langmuir
	b	คือ ค่าคงที่ของ Langmuir

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

- **Freundlich Isotherm**

ใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็น Heterogeneous แต่ไม่ได้สมมติว่าเป็น Monolayer เช่น วัสดุดูดซับที่เป็นชีวมวล เช่น ผงังเซลล์ของจุลินทรีย์ หรือชีวมวลอื่นๆ แสดงได้ดังสมการ

$$q_e = kC_e^{\frac{1}{n}}$$

เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นของอิออนที่จุดสมดุล (mg/l)
	q_e	คือ ปริมาณอิออนที่ดูดซับของวัสดุดูดซับที่จุดสมดุล (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 $\ln C_e$ จะได้ความลาดชันของกราฟมีค่าเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ $\ln k$

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

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- ความปั่นป่วน เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับ ขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านฟิล์ม และการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน ระดับความปั่นป่วนจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มน้ำที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ ส่งผลต่อความยากง่ายในการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับ

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

ที่พีเอช 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 ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่จำเป็นต้องควบคุมในขั้นตอนของการทดสอบ Adsorption isotherm เช่น จากการศึกษารายงานของ 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 การดูดซับฟลูออไรด์ของบอไซด์ที่มีไททานเนียมมากจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ระดับสูงสุดภายในระยะเวลา 90 นาที

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

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

Nigamananda et al. (2005) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ด้วย พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนส่งผลทำให้บอไซด์ที่มีไททานเนียมมาก มีพื้นที่ผิวขึ้นตามอุณหภูมิในช่วง $120-600^\circ C$ ดังตารางที่ 2.4 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	-

- สมบัติของสารที่ถูกลดซับ ได้แก่ ขนาด โมเลกุล การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกลดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของวัสดุดูดซับได้
- 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)

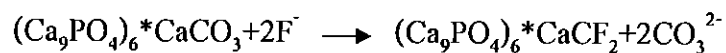
2.5 ถ่านกระดูก (Bone char)

ถ่านกระดูกเป็นถ่านที่เกิดจากการเผากระดูกสัตว์ เช่น กระดูกหมู กระดูกวัวและควาย ถ่านกระดูกจึงเป็นวัสดุที่สามารถเตรียมได้ง่ายและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ลักษณะของถ่านกระดูกมีสีขาวปนเทา มีความแข็งแต่เปราะ โครงสร้างภายในของถ่านกระดูกมีรูพรุนและเป็นโพรงอยู่ด้านในทำให้มีสมบัติในการดูดซับได้ดี



รูปที่ 2.7 ถ่านกระดูกสุก

Maiser (1947) รายงานไว้ในยุคแรกๆสำหรับการจัดฟลูออไรด์ ใช้กระดูกสัตว์ที่นำไปต้มเพื่อเอาไขมันและโปรตีนออกแล้วนำไปบดละเอียดและนำไปต้มต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นก็ปรับสภาพ (Neutralize) ด้วยน้ำและกรดไฮโดรคลอริก(HCl)ล้างน้ำอีกที จากนั้นก็นำไปอบจนแห้งแล้วคัดแยกขนาดด้วยตะแกรง จึงนำมาใช้ได้ ซึ่งองค์ประกอบของกระดูก (Bone) ก็คือ Carbonate Apatite $((Ca_9PO_4)_6 \cdot CaCO_3)$ ซึ่งมีปฏิกิริยาในการจำกัดคั่งแสดงในสมการดังนี้



เนื่องจากวิธีนี้ทำให้มีราคาแพง จึงได้มีการปรับปรุงวิธีต่อมาคือ ใช้ถ่านกระดูก(Bone char) ที่เตรียมจากกระดูกสัตว์ที่ถูกเผาซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ Tricalciumphosphate $((Ca_9PO_4)_6 \cdot CaCO_3)$ และคาร์บอน(C) โดยในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกระดูก (Bone Char) นี้สามารถทำได้โดยใช้ NaOH เข้มข้น 1.0% ก็จะเปลี่ยนฟลูออโรอะพาไทต์ $((Ca_9PO_4)_6 \cdot CaCF_2)$ ให้กลายเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ $((Ca_9PO_4)_6 \cdot Ca(OH)_2)$ แล้วฟลูออไรด์ก็จะหลุดออกมาในรูปสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF)

2.6 อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina)

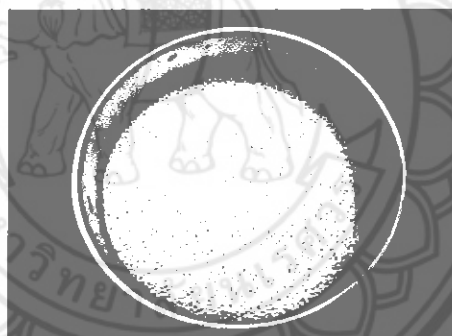
อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina) คืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงถึง 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นเพราะพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จะได้อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรืออะลูมินากัมมันต์ อะลูมินากัมมันต์เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีรูพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวมาก พื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 345-415 ตร.ม./ก. จึงมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี อะลูมินากัมมันต์มีความแข็งแรงมากไม่ละลายน้ำ สามารถทนต่อการเสียดสีและอุณหภูมิสูงได้ดี ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างสมบัติของอะลูมินากัมมันต์จากบริษัท ไนโซ จำกัด ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า 350 ตร.ม./ก. และมีความพรุนมากกว่า 0.38 มล./ก.

อะลูมินากัมมันต์ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่มกันอย่างแพร่หลายในสหรัฐอเมริกา อะลูมินากัมมันต์สามารถกำจัดฟลูออไรด์อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำและพีเอชต่ำ สามารถฟื้นฟูสภาพอะลูมินากัมมันต์กลับมาใช้งานใหม่ได้ด้วยสารละลาย NaOH และ H_2SO_4

ตารางที่ 2.5 สมบัติของอะลูมินากัมมันต์จากบริษัทไนโซ จำกัด

Item	Al ₂ O ₃ (%)	Size (mm)	Bulk density (g/cm ³)	Surface area (m ² /g)	Pore space (ml/g)	Water adsorption (%)
Activated Alumina Desiccant	90-95	Ø3-5	≥0.75	≥350	≥0.38	≥19
		Ø4-6	≥0.72	≥350	≥0.38	≥19
		Ø4-8	≥0.72	≥350	≥0.38	≥19
		Ø5-7	≥0.72	≥350	≥0.38	≥19
		Ø2-6	≥0.75	≥350	≥0.40	≥20
		Ø5-7	≥0.72	≥350	≥0.40	≥19
Activated Alumina Defluoridizer		Ø2-3	≥0.74	≥350	≥0.38	≥20
		Ø1-2.5	≥0.74	≥350	≥0.38	≥19
		Ø0.5-2	≥0.74	≥350	≥0.38	≥19

ที่มา : บริษัทไนโซ จำกัด



รูป 2.8 อะลูมินากัมมันต์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

Nigamananda et al. (2005) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่มโดยใช้บ็อกไซต์ที่มีไททาเนียมสูง (Titanium rich bauxite) ในประเทศอินเดีย พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300-400 °C ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากความร้อนส่งผลให้พื้นที่ผิวของบ็อกไซต์ที่มีไททาเนียมสูงมีค่าสูงขึ้น และอัตราการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดภายในระยะเวลา 90 นาที การดูดซับฟลูออไรด์มีค่าสูงขึ้นตามพีเอชของสารละลาย และมีค่าสูงสุดที่พีเอช 5.5-6.5 กลไกการดูดซับสอดคล้องกับ 1st order rate expression และข้อมูลสมดุลการดูดซับสอดคล้องทั้ง Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm การศึกษาของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้ม จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิตสารส้ม ดังตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากกระบวนการผลิตสารส้มที่ผลิตจากคาโอลิน จากองค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีออกไซด์ของซิลิกอน (SiO₂) และคาโอลินเป็นองค์ประกอบหลัก คือประมาณร้อยละ 40.0 และ 8.9 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังรายงานว่ากากของเสียจากกระบวนการผลิตดังกล่าวปราศจากสารอันตรายจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ได้อย่างปลอดภัย (Nigussie et al., 2007)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของกากของเสียจากกระบวนการผลิตสารส้มจากคาโอลิน

(Nigussie et al., 2007)

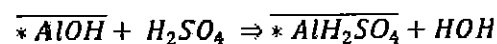
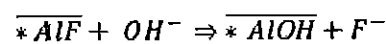
Chemical composition	Percent (wt.%)
Quartz (SiO ₂)	39.991
Kaolin	8.883
Al ₂ (SO ₄) ₃	1.778
Al(OH) ₃	0.878
CaSO ₄	0.194
Fe ₂ (SO ₄) ₃	0.023
Fe ₂ O ₃	0.001
MgSO ₄	0.008
Na ₂ SO ₄	0.007
K ₂ SO ₄	0.005

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

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



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



Tang et al. (2009) ศึกษาการดูดซับของฟลูออไรด์บน Activated alumina โดยใช้การทดลองแบบที่ละเท ศึกษาผลของระยะเวลา, pH, Ionic strength และ อิออนลบอื่นๆ ต่อการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า จากการทดสอบ Kinetic แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 10 ชม. เมื่อศึกษาผลของ pH ในช่วงที่ทำการศึกษา พบว่า การดูดซับฟลูออไรด์มีค่าลดลง

ตาม pH ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ Ionic strength ไม่ส่งผลต่อการดูดซับในช่วง pH ที่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตามพบว่าไอออนลบมีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ตามลำดับ คือ $\text{HPO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ตามลำดับ ขณะที่โลหะหนักที่เป็นพิษที่อาจพบได้ในแหล่งน้ำใต้ดิน เช่น As(V) และ Se(IV) จะส่งผลต่อการดูดซับของฟลูออไรด์บน AA เนื่องจากเป็นไอออนที่สามารถแข่งขันกับฟลูออไรด์ในการถูกดูดซับบนพื้นที่ดูดซับเดียวกัน



บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการงาน

การศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด ศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับ และศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับ ได้แก่ พีเอชของสารละลาย และขนาดของวัสดุดูดซับที่ใช้ โดยมีแผนการทดสอบรายละเอียดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดูดซับ

- อะลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina)
- ถ่านกระดูกสุก

3.1.1 สารเคมี

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

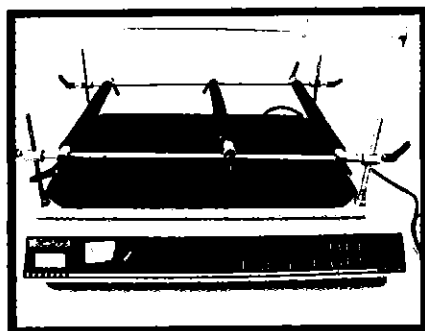
- Hydrochloric Acid (HCl)

3.1.2 เครื่องแก้ว

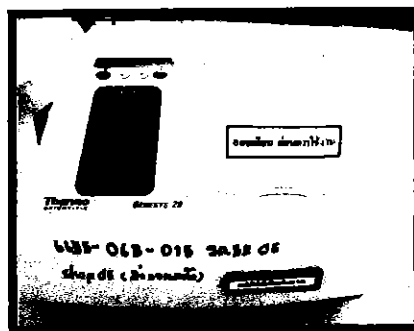
- บีกเกอร์ ขนาด 100 ml และ 200 ml
- ปิเปตปริมาตร ขนาด 1, 5 และ 10 ml
- กระจกบอควง ขนาด 50 ml
- ขวดปริมาตร ขนาด 50, 100, 500 และ 1000 ml
- ขวดแก้วใส่สารจุกแก้ว ขนาด 500 ml และ 1000 ml
- ลูกยางอุดสารเคมี
- ขวดสีชา
- หลอดหยดสารเคมี
- ข้อนตักสารเคมี

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

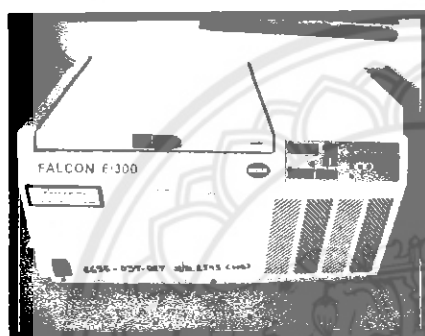
- pH meter
- ตะแกรงร่อน (Sieve)
- Spectrophotometer
- เตาเผา (Muffle Furnace)
- เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge)
- เตาอบ (Programmable lab oven)
- เครื่องเขย่าแนวราบ (Horizontal shaker)
- เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง (Balance)



เครื่องเขย่าแนวราบ



สเปกโตรโฟโตมิเตอร์



เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



เตาเผา

รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2 การเตรียมวัสดุอุดซัป

3.2.1 การเตรียมถ่านกระดูก

- นำกระดูกสุกรส่วนขาหน้าประมาณ 5 กิโลกรัม จากนั้นนำกระดูกมาเลาะเนื้อเยื่อและเอ็นออก ตัดเป็นท่อนเล็กๆ ดังรูปที่ 3.3

- นำกระดูกมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดูกไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 250 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และที่ 500 ± 2 องศาเซลเซียส อีก 30 นาที ในเตาเผาในห้องปฏิบัติการ แล้วทิ้งในเย็น

- เมื่อได้ถ่านกระดูกแล้วนำไปชั่งได้ถ่านกระดูก 3.45 กิโลกรัม หลังจากนั้นนำถ่านกระดูกมาทุบให้เป็นก้อนเล็กๆ ด้วยค้อนและทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16 และ 30 เพื่อคัดแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76 , 1.19-2.38 และ 0.60 - 1.19 มิลลิเมตร

- เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป



กระดุกสุกร



ถ่านกระดุกสุกร

รูปที่ 3.3 กระดุกสุกรก่อนเผาและหลังเผา

3.2.2 การเตรียมอะลูมินากัมมันต์

- นำอะลูมินากัมมันต์ที่ได้มาจากบริษัท ไนโซ จำกัด ขนาด 1.00-2.50 มิลลิเมตร มาทำการอบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป
- เก็บใส่ถุงพลาสติก เพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป

3.3 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

3.3.1 เตรียมสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม

- ชั่ง โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ปริมาณ 10.75 มิลลิกรัม นำมาละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร จะได้ สารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

3.3.2 สารละลาย SPADNS

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

3.3.3 สารละลายกรดเซอร์โคเนียม (Zirconyl-Acid Reagent)

ละลายเซอร์โคเนียมคลอไรด์ (Zirconyl Chloride Octahydrate, $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$) 133 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 350 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 500 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

3.3.4 สารละลายผสม Acid Zirconyl-SPADNS

ผสมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอร์โคเนียมอย่างละเท่าๆกัน สารละลายผสมนี้เก็บรักษาได้อย่างน้อย 2 ปี

3.3.5 สารละลายอ้างอิง

เจือจางกรดไฮโครคลอริกเข้มข้น 7 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วเติมลงในสารละลายเจือจาง SPADNS ที่เกิดจากการเติมสารละลาย SPADNS 10 มิลลิลิตรลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้นี้จะใช้ปรับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ให้เป็น 100%T (หรือเท่ากับ Blank) สารละลายนี้คงตัวเก็บได้นานอย่างน้อย 1 ปี

3.3.6 วิธีวิเคราะห์กราฟมาตรฐาน

เตรียมอนุกรมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ให้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครกรัม โดยเปิดสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ (1 มิลลิลิตร เท่ากับ 10 $\mu\text{g F}$) มา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิลิตร ลงใน Nessler tube ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 50 มิลลิลิตร เทลงในขวดรูปกรวยแล้วเติมสารละลายผสม Acid Zirconyl-SPADNS 10 มิลลิลิตร ลงในทุกขวด เขย่าให้เข้ากันหรืออาจเติมสารละลาย SPADNS และสารละลายกรดเซอโคนิลอย่างละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายอ้างอิงเป็นแบลคในการปรับ 100% T ของเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็นไมโครกรัมและ %T ที่อ่านได้จากแต่ละความเข้มข้น โดยใช้กราฟ SEMILOG



รูปที่ 3.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

3.4 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟลูออไรด์

- นำถ่านกระดูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38 - 4.76 มิลลิเมตร ที่ร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ ค้างบนเบอร์ 8 และอะลูมิน่ากัมมันต์ขนาด 1-2.5 มิลลิเมตร จำนวนอย่างละ 4 กรัม ใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร จำนวนอย่างละ 7 ขวด
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดพีเอชด้วย pH meter ใส่ขวดพลาสติกดังกล่าว จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร
- นำพลาสติกดังกล่าว ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1, 3, 6, 12, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง ตามลำดับ
- เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำมาแยกวัสดุดูดซับออกจากสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมუნเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นเริ่มต้น 570 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่จุดสมดุลของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด

3.5 การศึกษาหาไอโซเทิร์มของวัสดุดูดซับ

- นำถ่านกระดูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76 มิลลิเมตร ที่ร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ ค้างบนเบอร์ 8 มาจำนวน 1, 2, 3, 4, และ 5 กรัม ตามลำดับ และอะลูมิน่ากัมมันต์ขนาด 1.00-2.50 มิลลิเมตร มาจำนวน 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัมตามลำดับ มาใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดพีเอชได้ด้วย pH meter ใส่ขวดพลาสติกดังกล่าว จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร
- นำขวดพลาสติกทั้งหมด ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เขย่าเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง สำหรับถ่านกระดูก และ 24 ชั่วโมง สำหรับอะลูมิน่ากัมมันต์ตามลำดับ
- เมื่อเขย่าเสร็จจนครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำมาแยกวัสดุดูดซับออกจากสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมუნเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นเริ่มต้น 570 นาโนเมตร

- นำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาไอโซเทิร์มของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ว่าสอดคล้องตามสมการของ Freundlich Isotherm หรือ Langmuir Isotherm

3.6 การศึกษาผลของ pH ต่อการดูดซับฟลูออไรด์

- นำถ่านกระดูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38-4.76 มิลลิเมตร ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ ค้างบนเบอร์ 8 และอะลูมินาแกมมันด์ขนาด 1.00-2.50 มิลลิเมตรจำนวนอย่างละ 4 กรัม ใส่ในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร จำนวนอย่างละ 5 ขวด
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดพลาสติกดังกล่าว จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร โดยที่ปรับพีเอช ให้เป็น 3.0, 4.5, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับพีเอช
- นำขวดพลาสติกทั้งหมด ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เขย่าเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง สำหรับถ่านกระดูก และ 24 ชั่วโมง สำหรับอะลูมินาแกมมันด์ ตามลำดับ
- เมื่อเขย่าเสร็จจนครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำมาแยกวัสดุดูดซับออกจากสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นเริ่มต้น 570 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์

3.7 การศึกษาผลของขนาดของวัสดุดูดซับต่อการดูดซับฟลูออไรด์

- นำถ่านกระดูกจำนวน 3 ขนาด คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60-1.19 มิลลิเมตร 1.19-2.38 มิลลิเมตร และ 2.38-4.76 มิลลิเมตร ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16, 30 มาจำนวนขนาดละ 4 กรัม
- นำถ่านกระดูกทั้ง 3 ขนาด มาจำนวนขนาดละ 4 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร
- นำสารละลายฟลูออไรด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดพีเอชด้วย pH meter ใส่ขวดพลาสติกทั้ง 3 ขวด จำนวนขวดละ 50 มิลลิลิตร
- นำขวดพลาสติกทั้ง 3 ขวด ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตามแนวราบที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เขย่าเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง

- เมื่อเขย่าเสร็จจนครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำมาแยกวัสดุคุดซ์ับออกจากสารละลายฟลูออไรด์ จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายที่ได้ทำการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายที่ได้มาวัดฟลูออไรด์ ด้วยวิธี SPADNS โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นเริ่มต้น 570 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาขนาดที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

การศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด ศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับ และศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับ ได้แก่ พีเอชของสารละลาย และขนาดของวัสดุดูดซับที่ใช้ ซึ่งจากแผนการทดสอบในบทที่ 3 ได้ผลการทดสอบรายละเอียดดังนี้

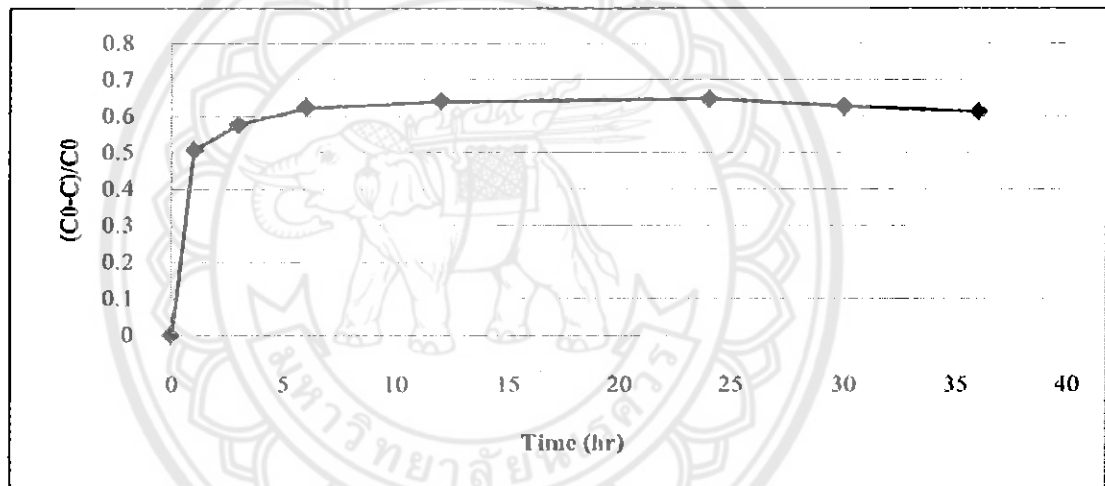
4.1 การศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์ โดยแปรเปลี่ยนเวลาสัมผัสที่ทำการศึกษาทั้งหมด 7 ค่า คือ 1, 3, 6, 12, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์เท่ากับ 6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร ปริมาตรสารละลายฟลูออไรด์ที่ใช้ 50 มิลลิลิตร ปริมาณถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์ที่ใช้ประมาณ 4 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าที่เวลาสัมผัส 1, 3, 6, 12, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง สัดส่วนความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับต่อฟลูออไรด์เริ่มต้นของถ่านกระดูกมีค่าเป็น 0.51, 0.58, 0.62, 0.64, 0.65, 0.63 และ 0.61 ที่เวลาต่างๆ กันตามลำดับ และสัดส่วนความเข้มข้นฟลูออไรด์ที่ถูกดูดซับต่อฟลูออไรด์เริ่มต้นของอะลูมินาแกมมันต์มีค่าเป็น 0.50, 0.63, 0.67, 0.69, 0.72, 0.73 และ 0.72 ที่เวลาต่างๆ กันตามลำดับ

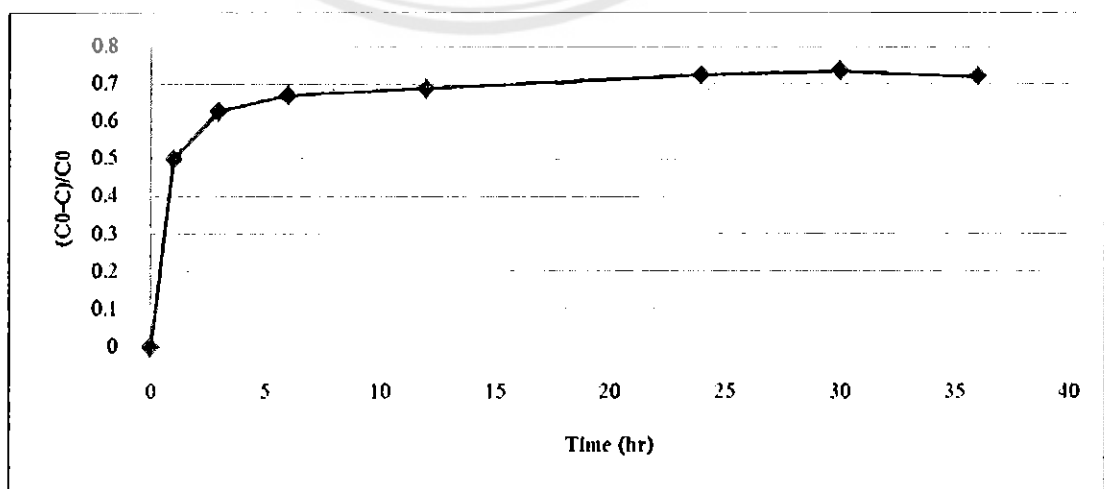
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าถ่านกระดูกกำจัดฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงถึง 12 ชั่วโมง โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแสดงว่าการกำจัดเริ่มเข้าสู่สมดุลแล้ว ดังนั้นเวลาในการสัมผัสของถ่านกระดูกที่เหมาะสมต่อการดูดซับของฟลูออไรด์ประมาณ 12 ชั่วโมง ซึ่งน่าจะเป็นการเพียงพอสำหรับการเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก ส่วนอะลูมินาแกมมันต์เวลาสัมผัสที่เหมาะสมเท่ากับ 24 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	$(C_0 - C_t)/C_0$	
	ถ่านกระดูก	อะลูมินากัมมันต์
1	0.51	0.50
3	0.58	0.63
6	0.62	0.67
12	0.64	0.69
24	0.65	0.72
30	0.63	0.73
36	0.61	0.72



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูก



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของอะลูมินากัมมันต์

4.2 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของถ่านกระดูกและอะลูมินากัมมันต์

ทำการทดสอบการดูดซับที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 6.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของสารละลายฟลูออไรด์ที่นำมาทดลองเท่ากับ 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีที่ pH เท่ากับ 5.71 ซึ่งเป็น pH ของน้ำกลั่น โดยใช้เวลาสัมผัสที่ใช้ 12 ชั่วโมง โดยใช้ถ่านกระดูกขนาด 2.38-4.76 มิลลิเมตร ปรับเปลี่ยนปริมาณถ่านกระดูกเท่ากับ 1, 2, 3, 4, และ 5 กรัม ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.6 และตารางที่ 4.2 และผลการทดสอบอะลูมินากัมมันต์ขนาด 1-2.5 มิลลิเมตร ที่ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของอะลูมินากัมมันต์เท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2, 4.3 และ รูปที่ 4.3 ถึง 4.6 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบไอโซเทิร์มของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิด พบว่าวัสดุดูดซับทั้งสองชนิด สอดคล้องกับสมการของ Freundlich Isotherm โดยสังเกตจากกราฟซึ่งกราฟแสดงเป็นเส้นตรง และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : R^2) ของทั้งสองสมการ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของ Freundlich Isotherm มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า จึงสามารถระบุสมการ Freundlich Isotherm การดูดซับฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดได้ดังนี้

สำหรับถ่านกระดูกจากรูปที่ 4.3 จะได้ค่าคงที่ของ Freundlich Isotherm ได้แก่ $K_f = 0.2$ และ $n = 1.063$ และได้สมการ Freundlich Isotherm ดังนี้

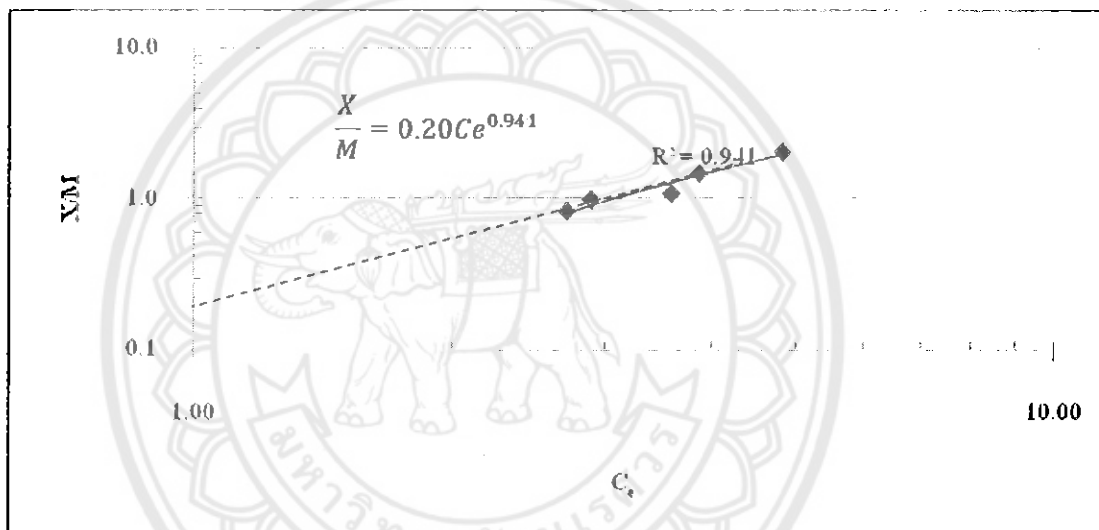
$$\frac{X}{M} = 0.20C_e^{0.941}$$

สำหรับอะลูมินากัมมันต์ จากรูปที่ 4.5 จะได้ค่าคงที่ของ Freundlich Isotherm ได้แก่ $K_f = 0.15$ และ $n = 1.006$ และได้สมการ Freundlich Isotherm ดังนี้

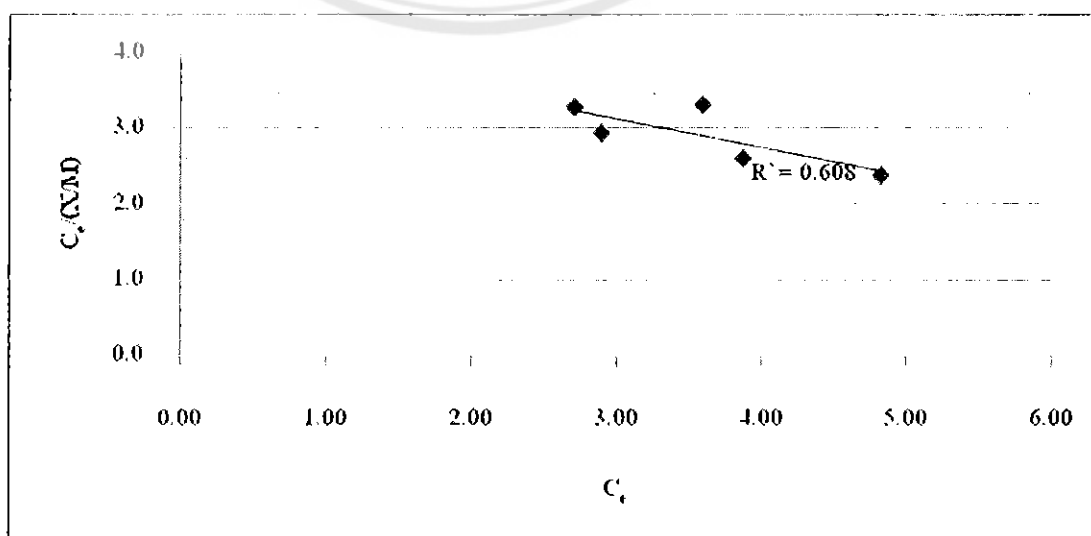
$$\frac{X}{M} = 0.15C_e^{0.994}$$

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของถ่านกระดุก

M (g)	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)
1.0	6.39	4.81
2.0	6.39	3.87
3.0	6.39	3.59
4.0	6.39	2.89
5.0	6.39	2.71
6.0	6.39	1.37



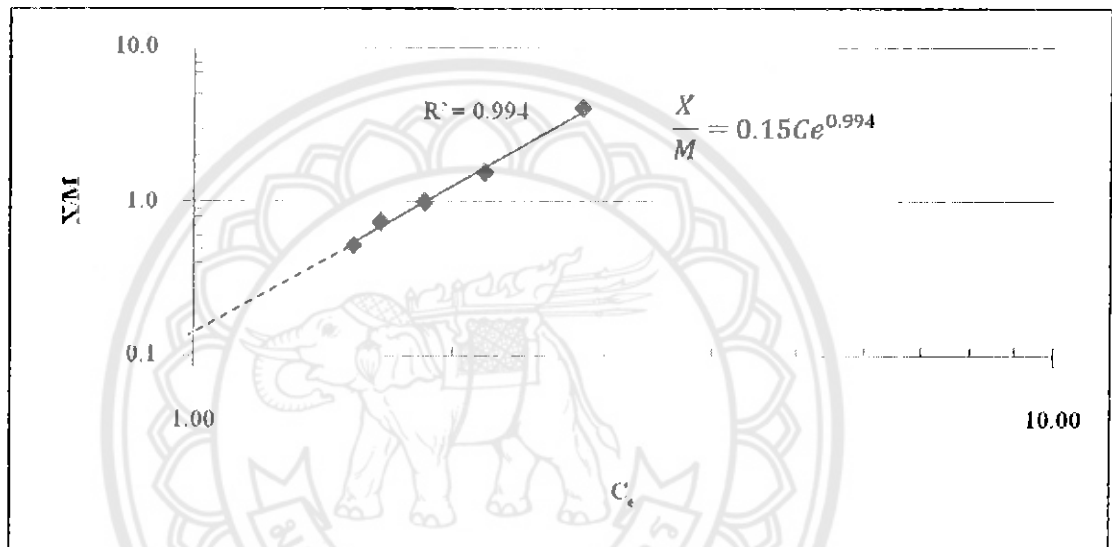
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของถ่านกระดุก



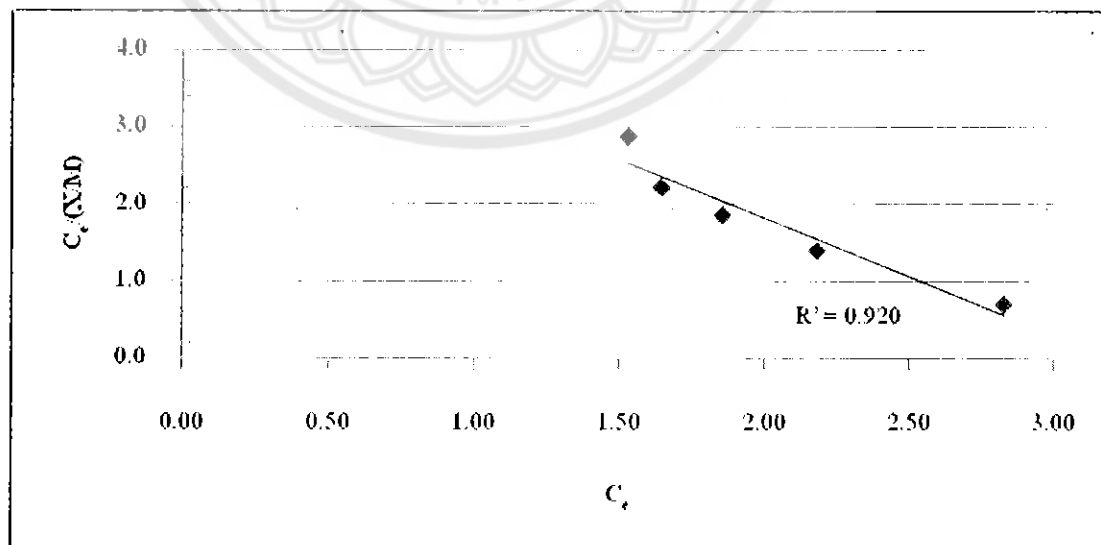
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของถ่านกระดุก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบไอโซเทอรั่มของอะลูมินากัมมันต์

M (g)	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)
1.0	6.39	2.82
3.0	6.39	2.18
5.0	6.39	1.85
7.0	6.39	1.64
10.0	6.39	1.53



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์

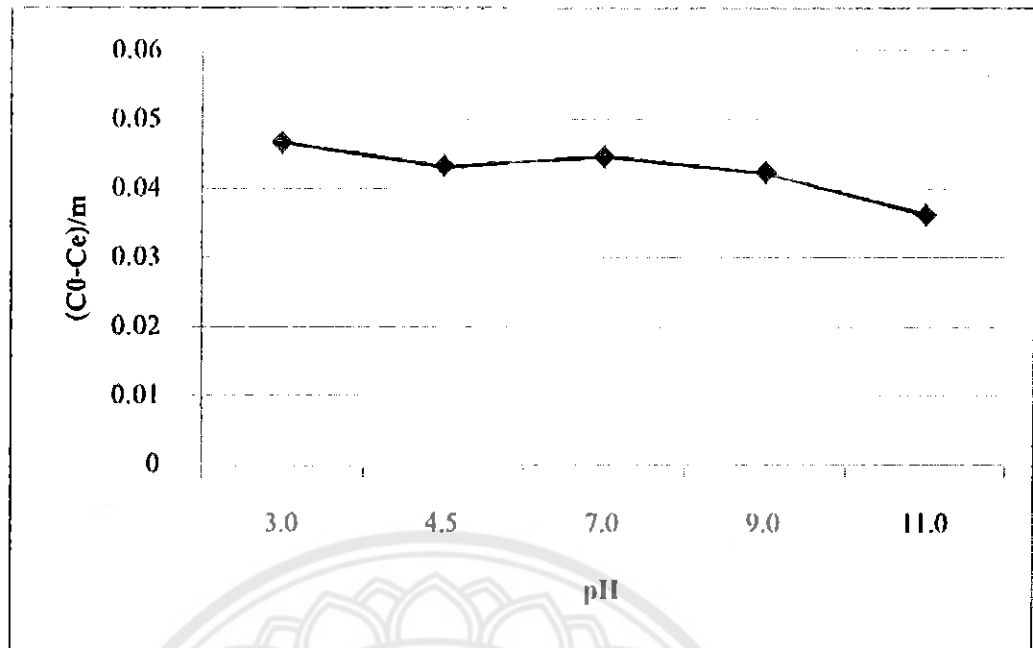
4.3 ผลการศึกษา pH ของสารละลายที่เหมาะสมต่อการดูดซับของฟลูออไรด์

ผลการศึกษา pH ของสารละลายที่เหมาะสมต่อการดูดซับของฟลูออไรด์ โดย pH ที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 5 ค่า คือ 3.0, 4.5, 7.0, 9.0, 11.0 ปรับ pH โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 โมล หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมล สารละลายฟลูออไรด์มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของถ่านกระดูกและอะลูมิน่ากัมมันต์ที่ใช้เท่ากับ 4 กรัม (80กรัม/ลิตร) ปริมาตรสารละลายฟลูออไรด์ 50 มิลลิลิตร ใช้อัตราเร็วรอบในการทำงานของเครื่องเขย่าที่ 100 รอบต่อนาที และเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง พบว่าที่ pH เท่ากับ 3.0, 4.5, 7.0, 9.0 และ 11.0 ถ่านกระดูกสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้เท่ากับ 0.047, 0.043, 0.045, 0.042 และ 0.036 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ส่วนอะลูมิน่ากัมมันต์สามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้เท่ากับ 0.055, 0.052, 0.050, 0.048 และ 0.046 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9

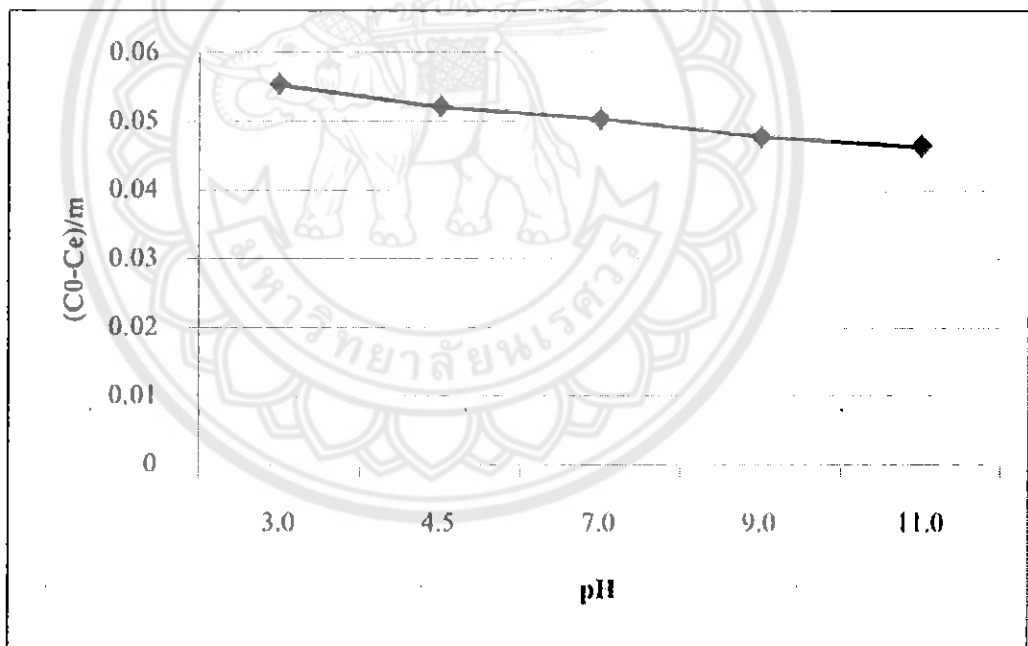
จากผลการทดสอบพบว่าถ่านกระดูกมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีเมื่อ pH ของสารละลายฟลูออไรด์เท่ากับ 3.0 และเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจะดูดซับฟลูออไรด์ได้น้อยลงเมื่อ pH เป็น 4.5, 7.0, 9.0 ที่ pH เพิ่มขึ้นเป็น 11.0 จะดูดซับฟลูออไรด์ได้ต่ำที่สุด และจากการทดสอบยังพบว่าอะลูมิน่ากัมมันต์จะสามารถดูดซับได้ดีในสภาวะที่สารละลายฟลูออไรด์สภาพเป็นกรด และจะดูดซับได้น้อยลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จากทดสอบวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดเราจะเห็นได้ว่าเมื่อความเป็นด่างของสารละลายเพิ่มขึ้นจากการที่เราปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำให้สารละลายเป็นเบสหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของวัสดุดูดซับ จะทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ขณะที่ฟลูออไรด์ก็มีประจุเป็นลบด้วยเช่นทำให้เกิดการผลักกันของประจุขึ้นระหว่างวัสดุดูดซับกับฟลูออไรด์ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการดูดซับฟลูออไรด์ลดลง (Ajmal Mohamad,2003)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อกับดูดซับฟลูออไรด์
ของถ่านกระดูกและอะลูมิน่ากัมมันต์

PH	ความสามารถในการดูดซับ $((C_0 - C_e)/m)$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	ถ่านกระดูก	อะลูมิน่ากัมมันต์
3.0	0.047	0.055
4.5	0.043	0.052
7.0	0.045	0.050
9.0	0.042	0.048
11.0	0.036	0.046

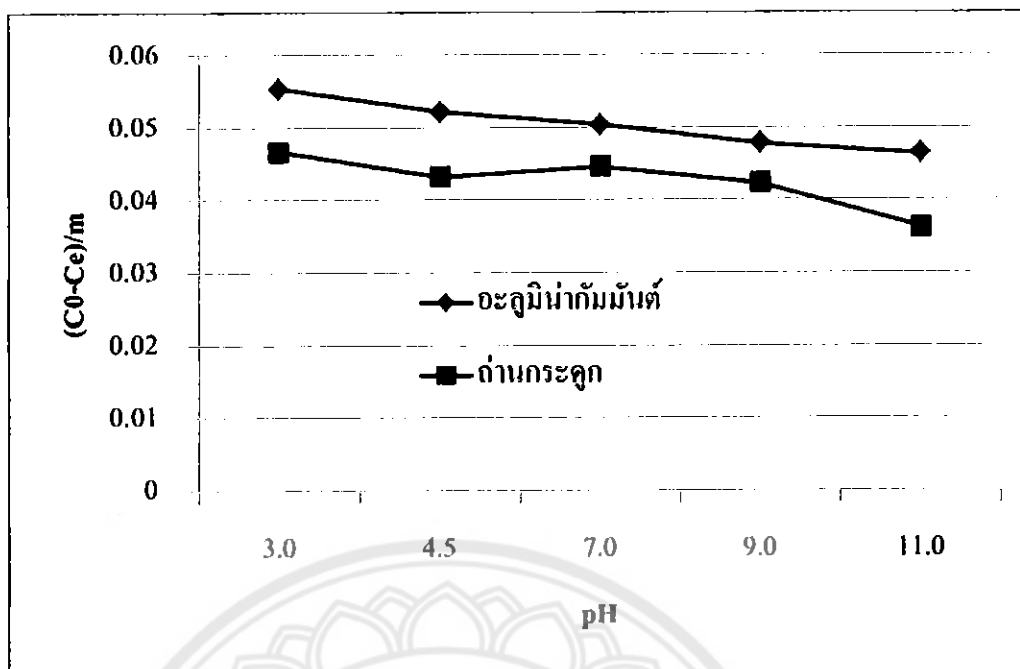


รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อกับดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุก



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายผลต่อกับดูดซับฟลูออไรด์ของอะลูมินากัมมันต์

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ถ่านกระดุกมีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์น้อยกว่า อะลูมินากัมมันต์เล็กน้อย และเมื่อพิจารณาผลของ pH ของสารละลายต่อการดูดซับ จะพบว่า pH สูง จะส่งผลทำให้ถ่านกระดุกและอะลูมินากัมมันต์ดูดซับฟลูออไรด์ได้ลดลงในลักษณะที่คล้ายๆกัน



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อกับดูดซับฟลูออไรด์
ของด่านกระดูกและอนุภาคน้ำกัมมันต์



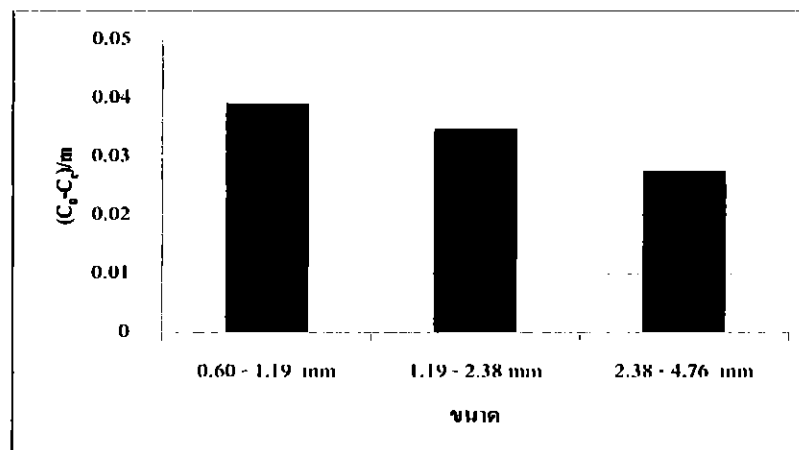
4.4 การศึกษาผลของขนาดด้านกระดูกต่อการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาผลของขนาดด้านกระดูกต่อการดูดซับฟลูออไรด์ทำการทดสอบ 3 ขนาด คือ 0.60-1.19 มิลลิเมตร 1.19-2.38 มิลลิเมตร และ 2.38-4.76 มิลลิเมตร ปริมาณด้านกระดูกที่ใช้ขนาดละ 4 กรัม (80กรัม/ลิตร) ความเข้มข้นของสารละลายฟลูออไรด์เริ่มต้นเท่ากับ 6.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีการปรับ pH ปริมาตรของสารละลายฟลูออไรด์เท่ากับ 50 มิลลิเมตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีและเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ขนาด 0.42-1.19 มิลลิเมตร สามารถการดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงสุด โดยมีสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ 0.039 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับด้านกระดูกที่มีขนาด 1.19-2.38 มิลลิเมตร, 2.38-4.76 มิลลิเมตร สามารถการดูดซับฟลูออไรด์ได้ 0.035 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.028 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งขนาด 2.38-4.76 มิลลิเมตร สามารถการดูดซับฟลูออไรด์ต่ำสุดคังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10

จากการทดสอบพบว่าด้านกระดูกที่ขนาดเล็กกว่าจะมีการดูดซับฟลูออไรด์ได้มากกว่าด้านกระดูกที่มีขนาดใหญ่กว่าเพราะด้านกระดูกที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงดูดซับได้ดีกว่าซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวว่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อวัสดุดูดซับมีขนาดเล็กลง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบขนาดของด้านกระดูกต่อการดูดซับฟลูออไรด์

ด้านกระดูก ขนาด (มิลลิเมตร)	ความสามารถในการดูดซับ $((C_0 - C_e)/m)$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0.60-1.19 มิลลิเมตร	0.039
1.19-2.38 มิลลิเมตร	0.035
2.38-4.76 มิลลิเมตร	0.028



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบขนาดของด้านกระดูกและที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟลูออไรด์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษากำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำด้วยถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์ในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด ศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับ และศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับ ได้แก่ พีเอชของสารละลาย และขนาดของวัสดุดูดซับที่สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาสัมพัทธ์ช่วง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และหลังจากนั้นการดูดซับฟลูออไรด์มีค่าคงที่

5.1.2 ถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์มีพฤติกรรมการดูดซับฟลูออไรด์สอดคล้องกับไอโซเทอรั่มของ Freundlich

5.1.3 สารละลายที่มี pH ต่ำ ส่งผลทำให้การดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูกและอะลูมินาแกมมันต์มีค่าสูงขึ้น

5.1.4 ถ่านกระดูกที่มีขนาดเล็ก มีความสามารถในการดูดซับฟลูออไรด์สูงกว่าขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทดสอบการฟื้นฟูสภาพ เพื่อศึกษานำกลับมาใช้ซ้ำเพิ่มเติม

5.2.2 ควรทดสอบที่ระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์อื่นๆ เพิ่มเติม

5.2.3 การใช้ถ่านกระดูก ส่งผลทำให้สารละลายที่เหลือมีสีและกลิ่น ซึ่งอาจจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการกำจัดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2545). ปัญหาและการแก้ไขปัญหาการได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป. เชียงใหม่: เชียงใหม่มีเอส การพิมพ์.

กลุ่มงานทันตสาธารณสุขชุมชน กองทันตสาธารณสุข กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

(2541). การใช้ฟลูออไรด์ระดับชุมชน. กรุงเทพฯ: องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.

ฉัตรภัทร กงปิ่น. (2551). การศึกษาภาวะโรคและผลกระทบต่อสุขภาพจากฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค ต.แม่ปู้คา ต.บวกก้าง อ.สันกำแพง จ.เชียงใหม่. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

มรรยาท เพ็ชรตรา. (2546). การลดฟลูออไรด์ในน้ำประปาบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ ส.ม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

คันสณี รัชชกุล. (ผู้บรรยาย). สถานการณ์ฟลูออไรด์ในน้ำของประเทศไทย. กลุ่มพัฒนาความร่วมมือทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กระทรวงสาธารณสุข.

คันสณี รัชชกุล, วุฒิชัย ชุมพลกุล และ สุพจน์ ชำนาญไพโร. (2552). แผนที่ฟลูออไรด์. กลุ่มพัฒนาความร่วมมือทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

สุพจน์ ชำนาญไพโร. (4 กรกฎาคม 2550). รถหน่วยบริการข้อมูลฟลูออไรด์สำหรับชุมชน. สืบค้นเมื่อ 22 กันยายน 2553, จาก http://icoh.anamai.moph.go.th/thai/index.php?option=com_content&view=article&id=118&catid=61&Itemid=124

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.

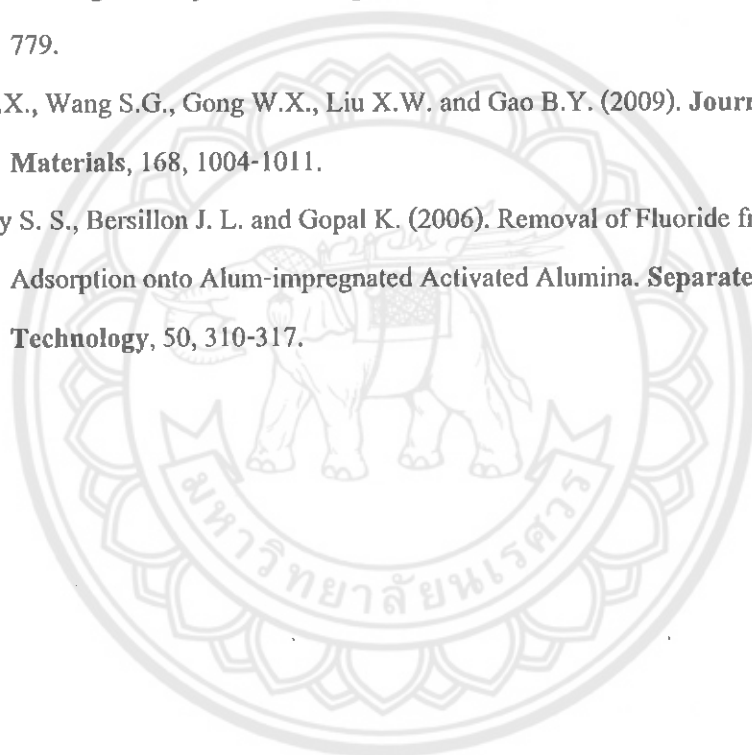
Metcalf and Eddy, Inc. (2003). *Waste Water Engineering: Treatment and Reuse*. 4th ed. McGraw Hill.

Mohapatra M., Anand S., Giles D.E. and Singh P. (2009). Review of Fluoride Removal from Drinking Water. *Journal of Environmental Management*, 91, 67-77.

Meenakshi and Maheswari R.C. (2006). Fluoride in Drinking Water and Its Removal. *Journal of Hazardous Materials*, B137, 456-463.

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.

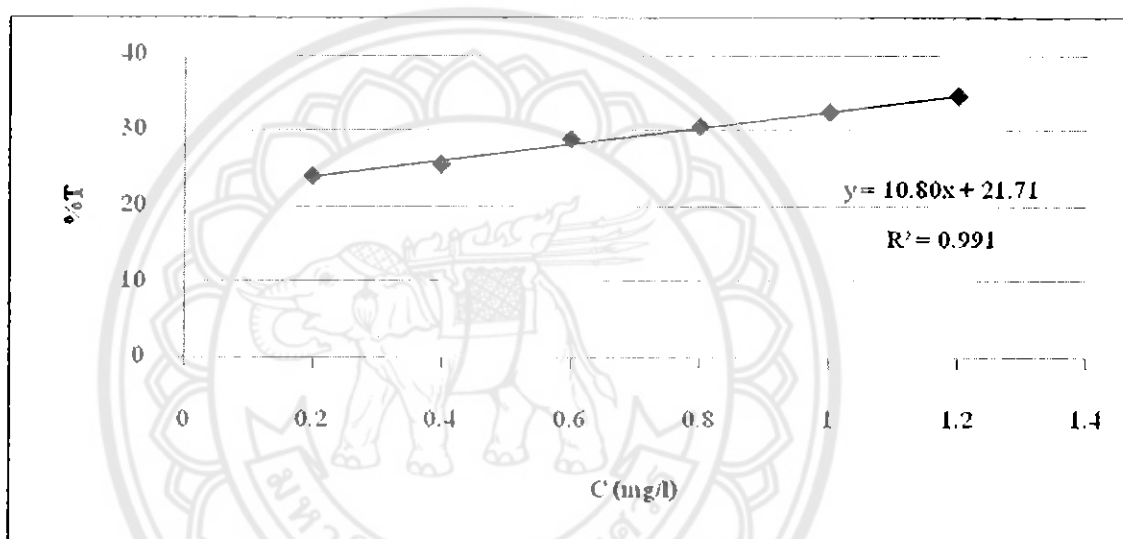
- Nigussie W., Zewge F. and Chandravanshi B.S. (2007) Removal of Excess fluoride from Water Using Waste Residual from Alum Manufacturing Process. **Journal of Hazardous Materials**, 147, 954-963.
- Tang Y., Guan X., Su T., Gao N. and Wang J. (2009). Fluoride Adsorption onto Activated Alumina: Modeling 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 ผลการทดสอบการทำกราฟมาตรฐาน (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	1.0	32.4
6	1.2	34.55

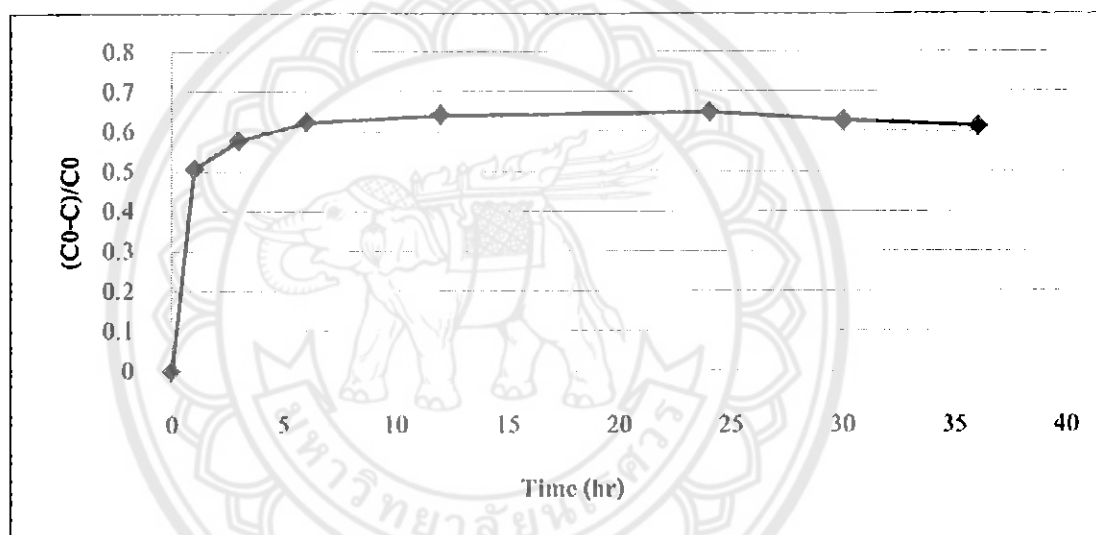


รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานฟลูออไรด์



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูก

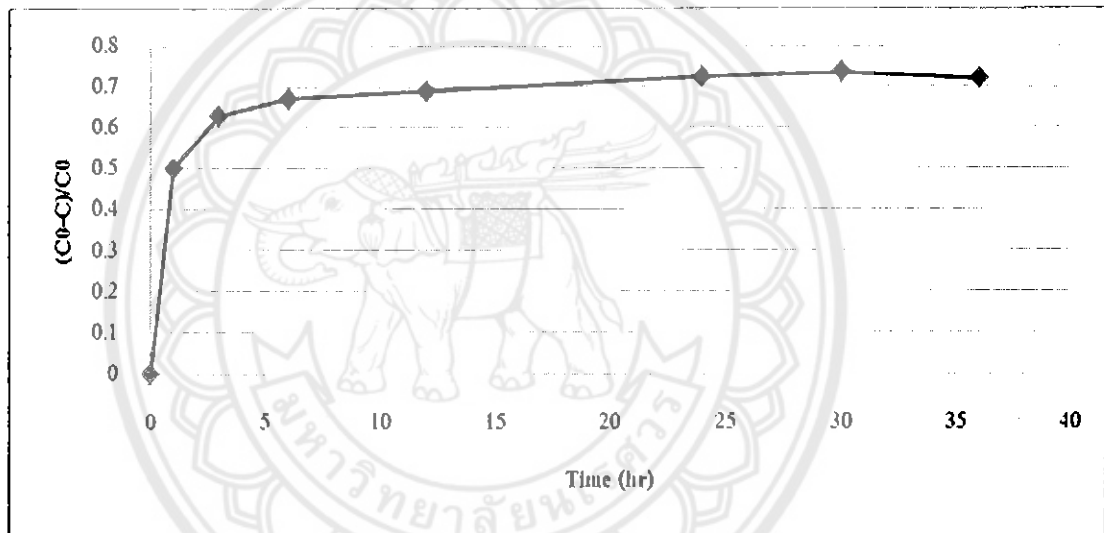
Time/hr	%T	c_0 (mg/l)	M(g)	F (mg/l)	$(C_0-C)/C_0$
1	28.65	6.53	4.00	3.22	0.51
3	27.65	6.53	4.00	2.75	0.58
6	27.00	6.53	4.00	2.45	0.62
12	26.75	6.53	4.00	2.34	0.64
24	26.65	6.53	4.00	2.29	0.65
30	26.95	6.53	4.00	2.43	0.63
36	27.15	6.53	4.00	2.52	0.61



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูก

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของอะลูมินากัมมันต์

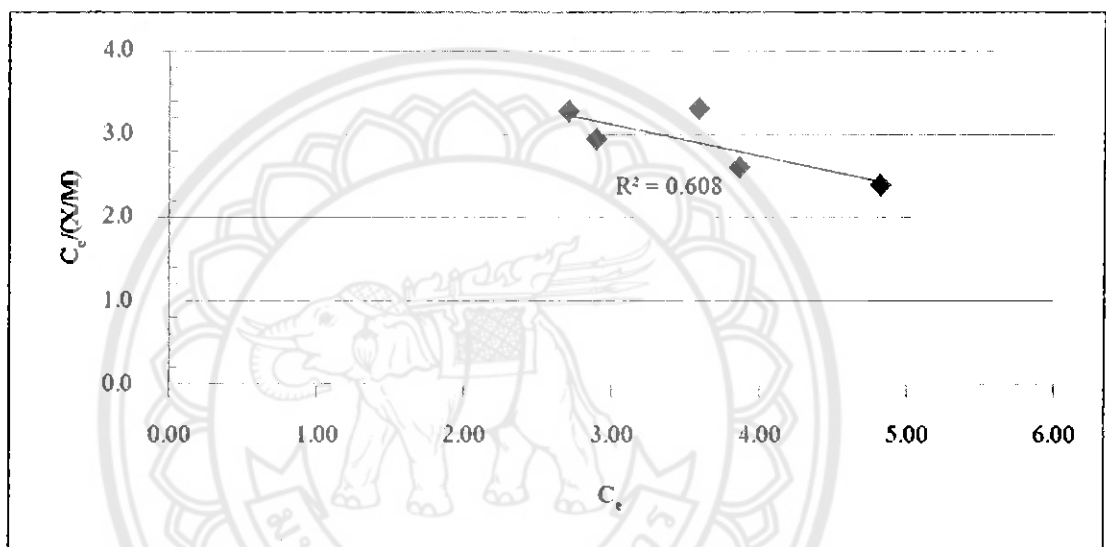
Time/hr	%T	c_0 (mg/l)	M(g)	F (mg/l)	$(C_0-C)/C_0$
1	28.75	6.53	4.00	3.26	0.50
3	26.95	6.53	4.00	2.43	0.63
6	26.35	6.53	4.00	2.15	0.67
12	26.10	6.53	4.00	2.04	0.69
24	25.60	6.53	4.00	1.81	0.72
30	25.45	6.53	4.00	1.74	0.73
36	25.65	6.53	4.00	1.83	0.72



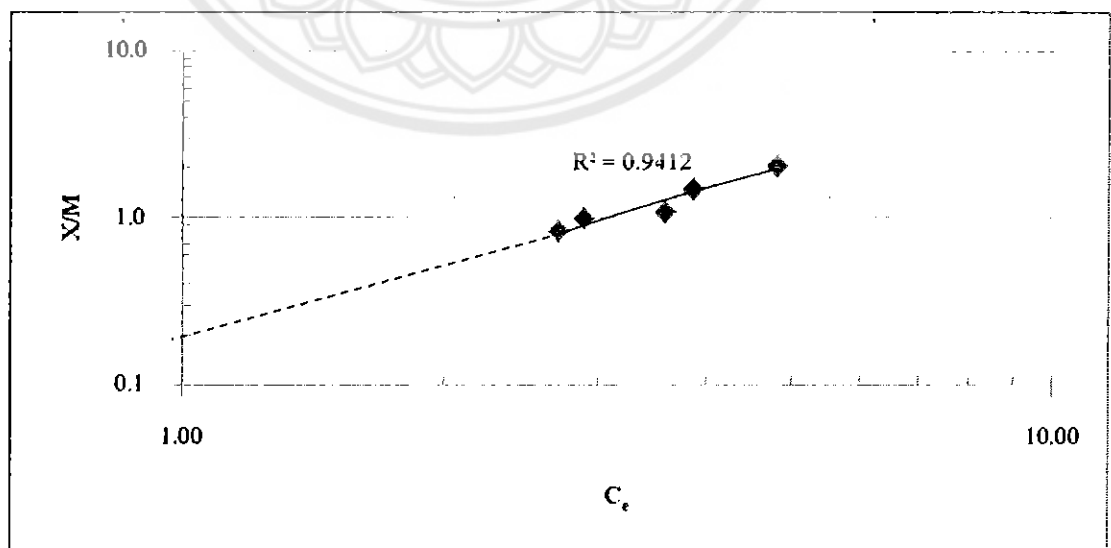
รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของอะลูมินากัมมันต์

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของถ่านกระดุก

%T	M(g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$C_0 - C_e$	X/M	$C_e/(X/M)$
32.10	1.00	6.39	4.81	2.02	2.02	2.38
30.05	2.00	6.39	3.87	2.97	1.45	2.60
29.45	3.00	6.39	3.59	3.25	1.09	3.31
27.95	4.00	6.39	2.89	3.94	0.99	2.93
27.65	5.00	6.39	2.71	4.13	0.83	3.28



รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของถ่านกระดุก



รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของถ่านกระดุก

สมการ Freundlich Isotherm ของถ่านกระดูกคือ

$$\frac{X}{M} = 0.20C_e^{1.063}$$

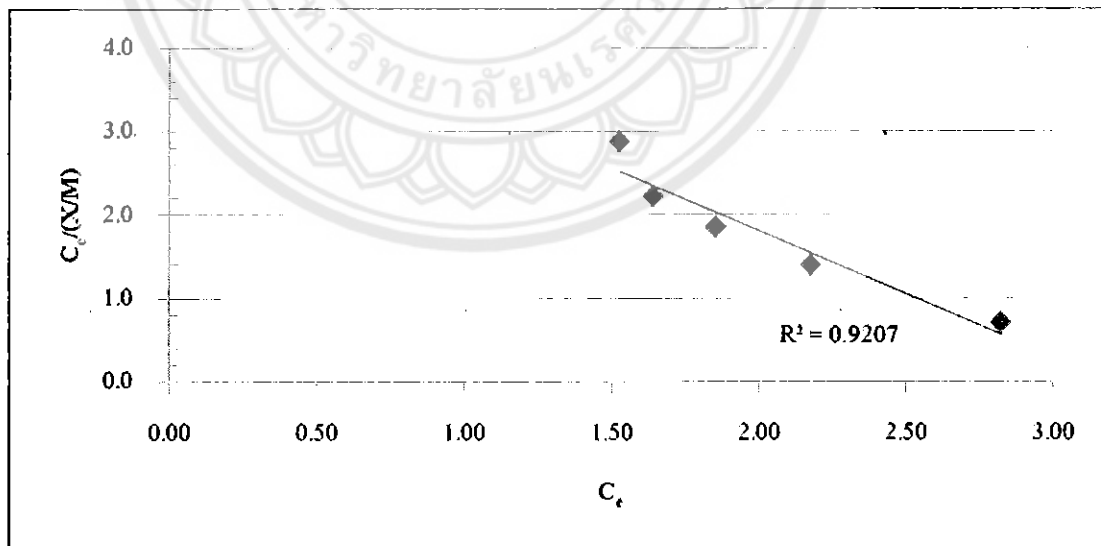
ความชันของกราฟ (1/n) = 0.941

ดังนั้น n = 1.063

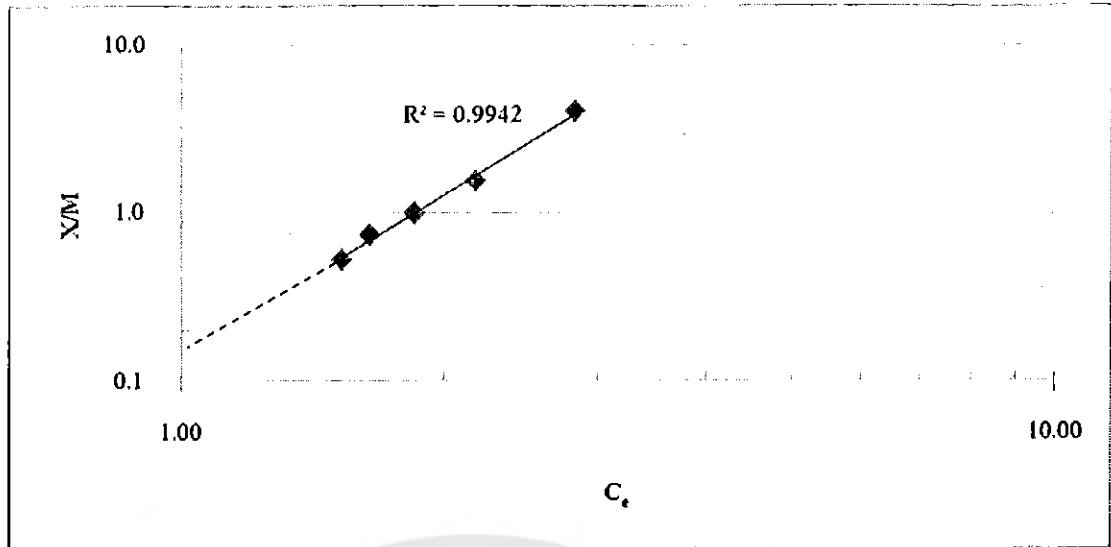
จุดตัดแกน y มีค่า (K_f) = 0.20

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบไอโซเทิร์มของอะลูมินากัมมันต์

%T	M(g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$C_0 - C_e$	X/M	$C_e/(X/M)$
27.80	1.00	6.39	1.82	4.01	4.02	0.70
26.40	3.00	6.39	1.18	4.66	1.55	1.40
25.70	5.00	6.39	1.85	4.98	1.00	1.86
25.25	7.00	6.39	1.64	5.20	0.74	2.21
25.00	10.00	6.39	1.53	5.31	0.53	2.88



รูปที่ ข.5 ผลการทดสอบหา Langmuir Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์



รูปที่ ข.6 ผลการทดสอบหา Freundlich Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์

สมการ Freundlich Isotherm ของอะลูมินากัมมันต์

$$\frac{X}{M} = 0.15C_e^{1.006}$$

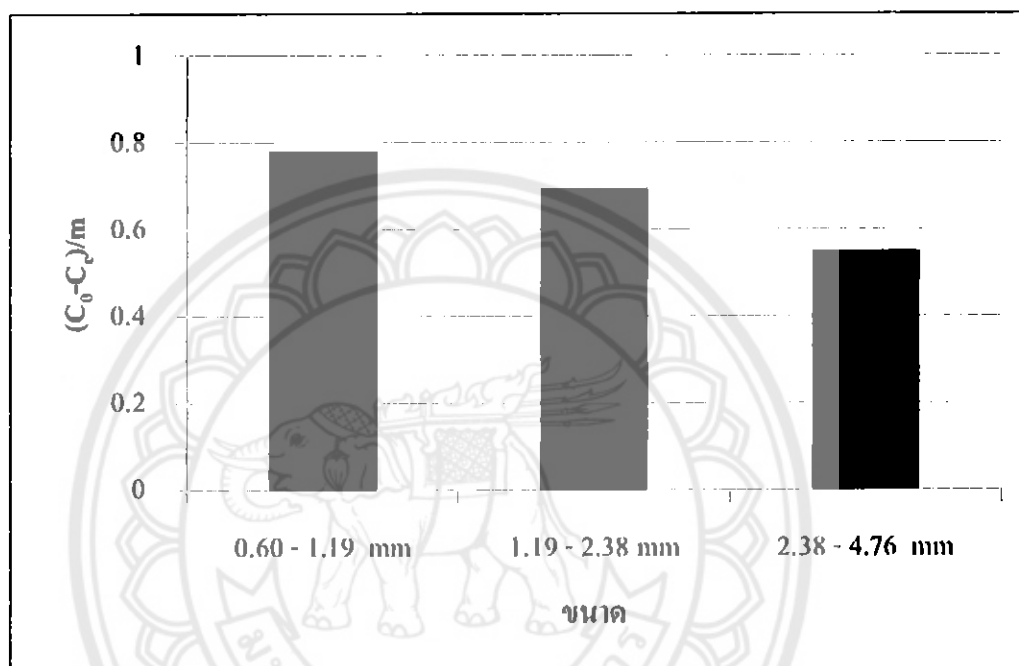
ความชันของกราฟ ($1/n$) = 0.994

ดังนั้น $n = 1.006$

จุดตัดแกนมีค่า (K_f) = 0.15

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุก

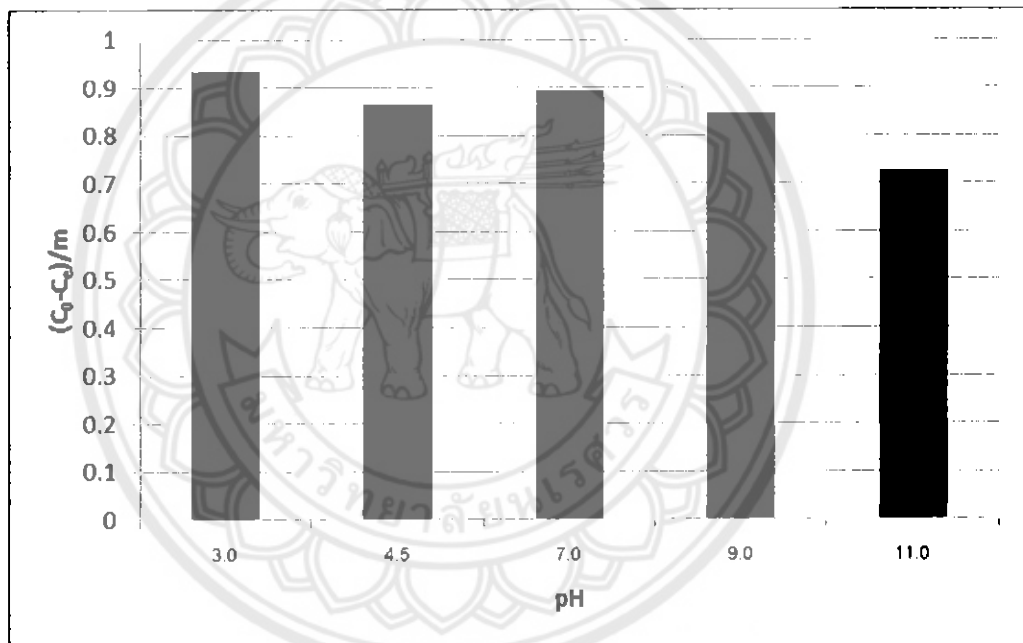
ขนาด(mm.)	%T	M(g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$(C_0-C_e)/M$
0.60 – 1.19	28.25	4.00	6.16	3.03	0.78
1.19 – 2.38	29.00	4.00	6.16	3.38	0.70
2.38 – 4.76	30.25	4.00	6.16	3.96	0.55



รูปที่ ข.7 ผลการทดสอบผลของขนาดต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดุก

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก

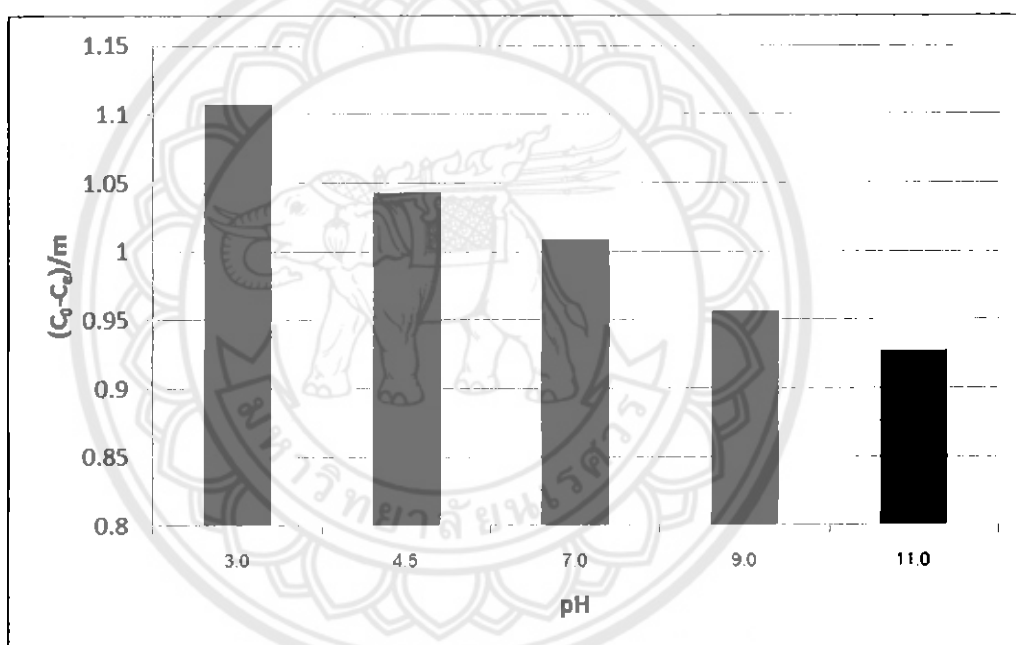
pH	M(g)	%T	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$(C_0-C_e)/M$
3.0	4.00	26.59	5.23	2.43	0.93
4.5	4.00	27.55	5.23	2.71	0.86
7.0	4.00	27.30	5.23	2.60	0.89
9.0	4.00	27.70	5.23	2.78	0.85
11.0	4.00	28.75	5.23	3.26	0.72



รูปที่ ข.8 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกระดูก

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของอะลูมินากัมมันต์

pH	M(g)	%T	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$(C_0-C_e)/M$
3.0	4.00	25.45	5.23	1.74	1.11
4.5	4.00	26.00	5.23	1.99	1.04
7.0	4.00	26.30	5.23	2.13	1.01
9.0	4.00	26.75	5.23	2.34	0.96
11.0	4.00	27.00	5.23	2.45	0.93



รูปที่ ข.9 ผลการทดสอบ pH ของสารละลายต่อการดูดซับฟลูออไรด์ของอะลูมินากัมมันต์



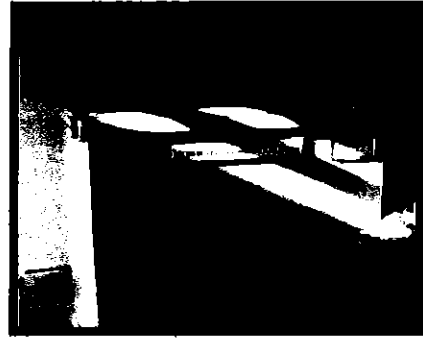
ภาคผนวก ค.

ภาพถ่ายในการทดลอง

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี



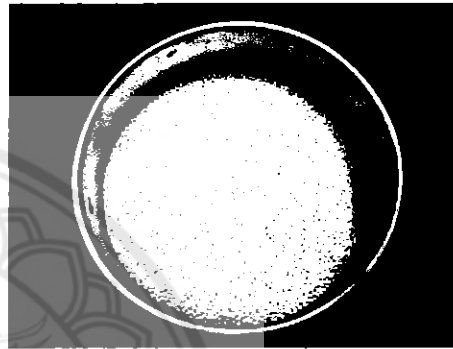
กระดุกสุกรก่อนเผา



นำกระดุกสุกรเข้าเตาเผา



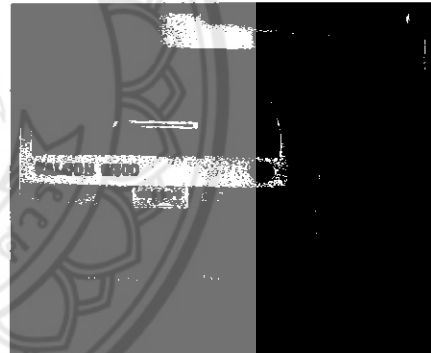
กระดุกสุกรหลังเผา



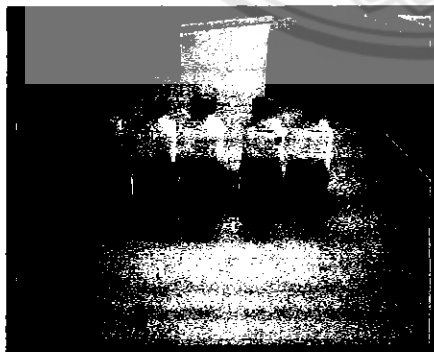
อะลูมิน่ากัมมันต์ขนาด 1-2.5 มม.



เครื่องเขย่าแนวราบ



เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



ตัวอย่างสารละลาย



การวัดฟลูออไรด์

รูปที่ ค.1 การเตรียมวัสดุคูดัชนีและการทดสอบ