

การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียชุมชนด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์
REMOVAL OF LEAD FROM MUNICIPAL WASTEWATER
USING COLUMN ALUM SLUDGE

นางสาววาดวัน สิงห์พงษ์
นางสาววิพะวานี บุญคิม
นายอภิรักษ์ โอจีน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียชุมชนด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์
REMOVAL OF LEAD FROM MUNICIPAL WASTEWATER
USING COLUMN ALUM SLUDGE

นางสาววาดวัน สิงห์พงษ์
นางสาววิษวानी บุญคุ้ม
นายอภิรักษ์ โฮจิ้น

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**REMOVAL OF LEAD FROM MUNICIPAL WASTEWATER
USING COLUMN ALUM SLUDGE**

MISS WADWAN SINGHAPONG
MISS WIPAWANEE BOONKIM
Mr. APHIRAK HOCHIN

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

โครงการพิเศษ	การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียชุมชนด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์ REMOVAL OF LEAD FROM MUNICIPAL WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE
ชื่อนักศึกษา	นางสาววาดวัน ลิงหงษ์ นางสาววิษะวานี บุญคิม นายอภิรักษ์ โฮจิ้น
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย โดยใช้ดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาออกจากน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีการเติมตะกั่ว 30 mg/L ฟอสเฟต 25 mg/L และมีค่า ซีโอดี 300 mg/L ออกแบบการทดลองในรูปของคอลัมน์ เปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ทำการปล่อยน้ำเสียดลงคอลัมน์ทุกๆ วัน ระยะเวลาดำเนินการทั้งสิ้นรวม 71 วัน ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเฉลี่ยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนสารส้ม เท่ากับ 98.31%, 99.01% และ 99.09% ตามลำดับ โดยตะกั่วจะฟอร์มตัวกับฟอสเฟต หรือสารประกอบอื่นๆ อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและถูกกำจัดขั้นแรกด้วยการกรอง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้น ตะกั่วจะถูกไฮโดรไลซ์อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ซึ่งสามารถถูกดูดซับบนดินหรือบนโลหะไฮดรอกไซด์ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้น สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีพบว่า คอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีค่ามากกว่าทรายตามลำดับคือ 50.65%, 50.85% และ 32.09% โดยซีโอดีจะถูกกำจัดด้วยการกรองและกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่อาจเกิดขึ้นภายในคอลัมน์ และสุดท้ายคือประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยซึ่งจะถูกกำจัดด้วยการกรองพบว่า คอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมากกว่าคอลัมน์ทราย คือ 73.42%, 72.23% และ 63.97% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทั้งสามมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

คำสำคัญ : ตะกอนสารส้ม คอลัมน์ การกำจัดตะกั่ว การกำจัดซีโอดี การกำจัดของแข็งแขวนลอย

Title	REMOVAL OF LEAD FROM MUNICIPAL WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE
Students	Miss Wadwan Singhapong Miss Wipawanee Boonkim Mr. Aphirak Hochin
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Chemistry
Academic Year	2013
Advisor	Asst. Prof. Pitsamai Chairatu-tai

ABSTRACT

This special project intend to determine removal efficiency of lead (II), COD and SS from municipal wastewater by using alum sludge from water treatment plant as the adsorbent. The experiments were carried out in form of column tests, using batch technique. In this study, three columns containing sand, recycled alum sludge and spiked alum sludge, were compared. The synthetic wastewater containing 30 mg/L lead (II), 25 mg/L phosphate and 300 mg/L COD, was fed into the system everyday, through 71 days of operating time. The results showed that the average removal efficiency of lead is 98.31%, 99.01% and 99.09% for sand, alum sludge and spiked alum sludge, respectively. Pb^{2+} was bonded with phosphate and other compounds in insoluble form and was filtrated by the materials. In addition, increasing pH resulted in increase lead removal efficiency since Pb^{2+} was hydrolyzed in high pH condition to $Pb(OH)_2$ which could be adsorbed onto soil or metal hydroxide. The removal efficiencies of COD and SS for columns containing alum sludge and spiked alum sludge were higher than that containing sand. The percentage COD removal of alum sludge, spiked alum sludge, and sand are 50.29%, 50.58% and 30.67%, respectively. Whereas, the percentage SS removal of alum sludge, spiked alum sludge, and sand are 73.42%, 72.23% and 63.97%, respectively. COD and SS were mainly removed by the filtration and biological degradation mechanisms inside the column. The results from Kruskal Wallis's one-way analysis of variance revealed that the percentage removal of lead, COD and SS by the adsorption on sand, alum sludge and spiked alum sludge columns were not significantly different ($p>0.05$).

Keywords : Alum sludge, Column, Lead removal, COD removal, SS removal

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาชี้แนะแนวทาง ให้คำปรึกษาในการ
ทำโครงการพิเศษจาก ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัยอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ นอกจากนี้ยังให้
กำลังใจและการดูแลอย่างดีทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงมาได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน และ อ.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ที่เข้าร่วมเป็น
คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพื่อ
นำไปแก้ไขโครงการพิเศษให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหาร ลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีทุกท่านได้แก่ พี่สาคร พี่ณัฐพล พี่ปราณี
และพี่ชัชชัย ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทดลอง และขอบคุณพี่สุรินทร์ สำหรับ
ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการใช้เครื่องอะตอมมิคแอนะไลเซอร์แบบสปีกโตรโฟโตมิเตอร์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสนทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์และความ
ช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการเก็บตะกอนสารส้มเพื่อทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆน้องๆ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ทุกคน ที่เป็นกำลังใจและ
ช่วยเหลือในด้านต่างๆ ให้คำปรึกษา ให้ข้อคิด ให้สติ ให้ความรู้ดีๆตลอดการวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของเราทั้งสามคนตลอดจนครอบครัว ที่เป็น
แรงผลักดัน แรงบันดาลใจ ให้กำลังใจและคอยสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมา และคอยสอน
ให้มีความมุ่งมั่นพยายามต่ออุปสรรคต่างๆจนทำให้การทำโครงการพิเศษเล่มนี้ประสบความสำเร็จ

นางสาววาดวัน สิงห์พงษ์
นางสาววิษะวานี บุญคุ้ม
นายอภิรักษ์ ไชยจีน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 โลหะหนัก	4
2.1.1 ตะกั่ว	4
2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำบางเขน	8
2.3 กลไกการกำจัดโลหะหนักของตะกอนสารส้ม	10
2.3.1 คุณลักษณะของตะกอนสารส้ม	10
2.3.2 เคมีของสารส้ม	11
2.4 กระบวนการดูดซับ	14
2.4.1 ลักษณะการดูดซับ	14
2.4.2 ประเภทของสารดูดซับ	15
2.4.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล	16
2.4.4 การเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นตัวดูดซับ	17
2.4.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การเคลื่อนที่ของตะกั่วภายในดิน	20
2.5.1 การเคลื่อนที่ของตะกั่วออกจากดินตะกอน	20
2.5.2 การดูดซับและการคายซับของตะกั่ว	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
2.6.1 การนำตะกอนสารส้มมากำจัดโลหะหนัก	23
2.6.2 การนำตะกอนสารส้มกลับมาใช้ประโยชน์	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	27
3.2 ลักษณะตะกอนและน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2.1 การเตรียมดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม	28
3.2.2 การเตรียมน้ำเสีย	28
3.2.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย	29
3.3 การเตรียมคอลัมน์	29
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย	30
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	32
4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว	32
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี	35
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย	37
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก วิธีการดำเนินงาน	45
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง	54
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว	4
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย	29
ตารางที่ 4.1 ปริมาณตะกั่วและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	33
ตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชของน้ำเสียทั้งก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	34
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในคอลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance	34
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	36
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในคอลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance	36
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม	37
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในคอลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance	38

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา	9
รูปที่ 2.2 Stability Diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น	12
รูปที่ 2.3 สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นของตะกอนสารส้มที่พีเอชต่างๆ	13
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังตัวดูดซับ	17
รูปที่ 2.5 การแบ่งเขตของชั้นตัวดูดซับของหน่วยดูดซับ	18
รูปที่ 2.6 ค่าพีเอชของสารละลายต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของตะกั่วในน้ำ	20
รูปที่ 3.1 การบรรจุคอลัมน์	30
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน	31
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	34
รูปที่ 4.2 ค่าพีเอชของน้ำเสียก่อนผ่านคอลัมน์ และน้ำเสียหลังผ่านคอลัมน์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	35
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมผสมสารส้ม	37
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม	38

คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
cm	เซนติเมตร
COD	ซีโอดี (ความต้องการออกซิเจนทางเคมี)
<i>df</i>	องศาความเป็นอิสระ
dS m ⁻¹	เดซิซีเมนส์ต่อเมตร
EC	ค่าการนำไฟฟ้า
g	กรัม
mg	มิลลิกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
ms/cm	มิลลิวินาทีต่อเซนติเมตร
<i>N</i>	จำนวนตัวอย่าง
N	นอร์มัล
nm	นาโนเมตร
ppm	ส่วนในล้านส่วน
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SS	ของแข็งแขวนลอย
sig.	ระดับนัยสำคัญ
%	เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ
°C	องศาเซลเซียส

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบัน ประเทศไทยได้มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประชาชนมีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีปัญหาตามมานั้นคือ ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม อันเกิดจากของเสียที่ถูกปล่อยออกจากกระบวนการผลิตออกสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นทางน้ำ ดิน หรือ ทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางน้ำที่สำคัญและเป็นปัญหาใกล้ตัวคือน้ำเสียชุมชน อันเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของคนในชุมชน และกิจกรรมที่เป็นอาชีพ (อา- นุช แก้ววงศ์, 2548) ซึ่งคุณสมบัติของน้ำเสียชุมชนจะแตกต่างกันออกไป แต่ว่าโดยทั่วไปแล้ว น้ำเสียชุมชนประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ น้ำมันและสารแขวนลอย ของแข็ง สารซักฟอก รวมถึงโลหะหนักและสารพิษ โดยเฉพาะตะกั่วที่อาจปนเปื้อนมาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่รอบๆชุมชน หรืออุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่นการบัดกรี การชุบโลหะ (สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย, 2547) การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำอาจก่อให้เกิดการสะสมของสารพิษ และมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ อาจทำให้เกิดมะเร็ง โดยเฉพาะมะเร็งไต เกิดความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ (Pagliuca, *et al.*, 1990) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆอีกด้วย แนวทางการกำจัดตะกั่วมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนอิเล็คตรอน หรือการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน วิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายและมีต้นทุนสูง (ชลทิศ แก้วลี, 2547) จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุต้นทุนต่ำที่มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักได้ดีมาประยุกต์ใช้ เช่น เซลลูโลส (Xiaolin, *et al.*, 2012) หรือดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา (ชลทิศ แก้วลี, 2547; ชนิตา สีหาโมก, 2553)

ในกระบวนการผลิตน้ำประปาจะต้องมีขั้นตอนการตกตะกอน (Clarification) เพื่อทำน้ำให้ใส โดยการเติมปูนขาว สารส้ม หรือสารโพลิอิเล็กโทรไลต์ เพื่อช่วยในการรวมตะกอนและตกตะกอนของอนุภาคของแข็งในน้ำดิบ ลักษณะของดินตะกอนที่ตกลงมา จะมีสารเคมีบางส่วนปนอยู่และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ ตะกอนสารส้ม (Alum sludge) ในประเทศไทยมีโรงผลิตน้ำประปาจำนวนมากนั้นหมายถึงจะเกิดของเสียที่เรียกว่าตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาที่จะต้องกำจัดจำนวนมากในปริมาณ 75,00-105,000 กิโลกรัมต่อวันหรือประมาณ 75-105 ตันต่อวัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความต้องการในการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น (การประปานครหลวง, 2555) ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะถูกกำจัดโดยนำมาทิ้งที่บ่อกักตะกอน ปล่อยให้ตกตะกอนสะสมจนชั้นขึ้น แล้วจึงใช้เรือสูบน้ำมาที่บ่อดักตะกอน และลานตากตะกอนเพื่อตากตะกอนให้แห้ง

ปัญหาที่พบในปัจจุบันนี้คือพื้นที่ในการจัดการกากตะกอนไม่เพียงพอ ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจ้างรถขุดดินเพื่อพลิกตะกอนให้แห้งเร็วขึ้น (การประปานครหลวง, 2548) รวมถึงการทำดินตะกอนให้แห้งอีกวิธีหนึ่งด้วยเครื่องอัดตะกอน (Filter press) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง (Koppers, 1989) จากการศึกษาคุณสมบัติของดินตะกอนจากการผลิตน้ำประปาพบว่า อุดมไปด้วยสารอินทรีย์ ฆาดสารอินทรีย์และสารกลุ่มเส้นใย (fiber) ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช มีปริมาณสารอูมิเนียมสูง และเนื้อดินเบาอุ้มน้ำจะพองตัวได้เมื่อชุ่มน้ำ และมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาใช้ในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้มีการนำเอาดินตะกอนมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจ เช่นนำมาทำเป็นดินวิทยาศาสตร์โดยการปรุงแต่งด้วยสารอินทรีย์หรือปุ๋ยเพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยและแร่ธาตุที่จำเป็นต่อพืช นำมาผลิตเป็นเครื่องปั้นดินเผา (ชัยวัฒน์ วรพิบูลพงศ์, 2547) หรือ นำมาเป็นสารเติมแต่ง (additive) ในการปรับปรุงของเสีย (waste) หรือน้ำเสียจากชุมชน (Zhao, *et al.*, 2008; Yang, *et al.*, 2011) หรือนำมากำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (Wei Chu, 1999; Zazouli, *et al.*, 2008; Bonzongo and Hovsepya, 2009)

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษานำดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามากำจัดซีโอดีของแข็งแขวนลอย และโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียชุมชน นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มแร่ธาตุที่จำเป็นต่อพืชแก่ดินตะกอนเพื่อให้สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดดินตะกอน ด้วยการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยโดยใช้ดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในรูปแบบคอกถ่ม

1.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ระหว่างดินตะกอน ดินตะกอนผสมสารส้ม และทราย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษามาจากโรงผลิตน้ำบางเขน และโรงผลิตน้ำสามเสน โดยทำการเก็บเพียงครั้งเดียวใช้ตลอดการทดลอง

1.3.2 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากคุุระบายน้ำบริเวณหอพักนักศึกษา บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำการเก็บทุกสองสัปดาห์นำมาเติมซูโครส เพื่อให้มีค่าซีโอดี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายตะกั่ว 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายฟอสเฟต 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3.3 คอลัมน์ที่ใช้ศึกษาจำนวน 5 คอลัมน์ ได้แก่ คอลัมน์ทราย 1 คอลัมน์ และคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มอย่างละ 2 คอลัมน์ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน

1.3.4 ปล่อยน้ำลงสู่คอลัมน์และเก็บน้ำทุกสัปดาห์ ตลอดระยะเวลาทำการทดลองคือ 71 วัน ทำการวัดพารามิเตอร์ของน้ำที่ผ่านคอลัมน์ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และปริมาณตะกั่ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถลดปริมาณตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยที่อาจปนเปื้อนออกมาจากน้ำทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้

1.4.2 สามารถลดปริมาณดินตะกอนที่เกิดจากระบบผลิตน้ำประปาโดยการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เพื่อเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอน และเป็นการเพิ่มคุณค่าให้แก่ทรัพยากร

1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งในระดับอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีเลขอะตอมในช่วง 23-92 อยู่ในคาบ 5-7 ของตารางธาตุและความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ในสถานะปกติโลหะหนักเมื่ออยู่ในรูปของธาตุบริสุทธิ์มีความเป็นพิษเล็กน้อย แต่ถ้าอยู่ในรูปของสารประกอบบางตัวจะเป็นอันตรายมาก โลหะหนักมีทั้งหมด 68 ธาตุ เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม สังกะสี ทองแดง นิกเกิล โครเมียม เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ สารหนู เป็นต้น โลหะหนักที่มีบทบาทสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม สารหนู มนุษย์ได้รับโลหะหนักเข้าไปในร่างกาย เนื่องจากโลหะหนักสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหารและในกระบวนการทางชีวภาพ มนุษย์อาจจะบริโภคเข้าไปโดยตรง หรือได้สัมผัส หรือได้รับโดยทางอ้อม มักพบโลหะหนักปนเปื้อนในตะกอนมากกว่าในน้ำเสมอ เพราะตะกอนมีประจุลบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนโลหะหนักมีประจุเป็นบวก จึงมีความสามารถเกาะยึดกันได้ดีกว่าในน้ำ (มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์, 2547)

2.1.1 ตะกั่ว (Lead)

ก. คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ เป็นโลหะสีเทาอมน้ำเงิน มีลักษณะอ่อนสามารถตัดขาดได้ง่าย เมื่อหลอมหรือถูกตัดขาดใหม่ๆ ผิวหน้ามีลักษณะเป็นเงา ในตารางธาตุ ตะกั่วอยู่ในกลุ่มที่ IVa มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) เท่ากับ 82 และน้ำหนักเชิงอะตอม (atomic weight) เท่ากับ 207.19 ตะกั่วมีไอโซโทปได้หลายไอโซโทป ที่พบในธรรมชาติคือ ^{194}Pb (ร้อยละ 1.4), ^{206}Pb (ร้อยละ 25.2), ^{207}Pb (ร้อยละ 21.7) และ ^{208}Pb (ร้อยละ 51.7) ไอโซโทปที่เกิดจากการสังเคราะห์คือ ไอโซโทปที่มีน้ำหนักเชิงอะตอมเท่ากับ 195-203, 205 และ 209-214 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตะกั่ว แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว

สารประกอบตะกั่ว	MP (°C)	BP (°C)	SpGR	SW
โลหะ lead	327.4	1.740	11.34	none
Anhydrous lead acetate	280	NA	3.25	443 (20)
Basic lead acetate	75	NA	NA	625 (15)
Lead acetate trihydrate	75	200	2.55	456 (15)
Lead tetraacetate	175	NA	2.228	NA

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว (ต่อ)

สารประกอบตะกั่ว	MP (°C)	BP (°C)	SpGR	SW
Lead carbonate	315	NA	6.6	0.0011 (20)
Basic lead carbonate	NA	NA	6.14	NA
Lead fluoride	855	1,290	8.24	0.64 (20)
Lead chloride	501	950	5.84	9.9 (20)
Lead bromide	373	916	6.66	8.44 (20)
Lead iodide	402	954	6.16	0.63 (20)
Lead oxide	888	1,472	9.53	0.017 (20)
Lead dioxide	290	NA	9.375	none
Lead sesquioxide	370	NA	NA	none
Lead tetraoxide	NA	NA	9.1	NA
Lead monosilicate	700-784	NA	6.50-6.65	NA
Tribasic lead silicate	705-733	NA	7.52	NA
Tribasic lead sulfate	NA	NA	6.9	0.0262 (18)
Tetraethyllead	-136.80	200	1.653	0.00029 (25)
Tetramethyllead	-27.5	110	1.995	none

ที่มา : Merck (1997), IPCS (1995), Daubert and Danner (1989)

MP = จุดหลอมเหลว (°C), BP = จุดเดือด (°C), SpGR = ความถ่วงจำเพาะ, SW = การละลายน้ำ, กรัม/ลิตร(ที่อุณหภูมิ), NA = ไม่มีข้อมูล, none = ไม่ละลายน้ำ

ข. การใช้ประโยชน์ โลหะตะกั่วและสารประกอบตะกั่วมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่างๆอย่างมาก ดังนี้

1) โลหะตะกั่ว

- ใช้ทำท่อประปา เป็นโลหะที่มีความอ่อนไหวต่อปฏิกิริยาเคมีน้อย และตะกั่วสามารถหล่อให้เป็นรูปต่างๆได้ง่าย จึงมีการนำมาทำเป็นท่อประปา ต่อมาพบว่าเมื่อท่อประปาถูกใช้เป็นเวลานาน ตะกั่วสามารถละลายออกมาในน้ำประปาได้บ้างเล็กน้อย เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค จึงเลิกการใช้ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว

- เป็นวัสดุหุ้มสายไฟฟ้าและสายโทรคมนาคม เป็นวัสดุหุ้มป้องกันส่วนของสายไฟฟ้าและสายโทรคมนาคมที่ฝังใต้ดิน เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติซึ่งสามารถค้ำให้โค้งงอได้ดี

และยังไม่พุก่อนอีกด้วย แผ่นตะกั่ว ที่ใช้มีโลหะอื่นผสมคือ ดีบุกร้อยละ 0.05-0.25 สารหนูร้อยละ 0.1-0.2 และบิสมัท ร้อยละ 0.07-0.2

- ใช้ทำหัวกระสุนปืน เพราะมีความหนาแน่นสูงและทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย เนื่องจากตะกั่วมีความอ่อนจึงต้องผสมกับธาตุอื่น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของหัวกระสุนปืน

- ใช้เคลือบแท่งและอุปกรณ์อื่นที่ต้องสัมผัสกับก๊าซหรือของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ในการผลิตกรดซัลฟูริก การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม และกระบวนการผลิตทางเคมีหลายชนิด เช่น ฮาโลจิเนชัน(halogenations), ซัลโฟเนชัน (sulfonation)

- เป็นวัสดุป้องกันรังสีชนิดต่างๆ ที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ได้แก่ รังสีแอลฟา เบตา และ เอกซเรย์ (x-ray)

- ใช้ในการผลิตสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ของตะกั่ว รวมทั้ง เตตระเอทิลเลด (etraethyllead)

- ใช้ผลิตโลหะผสม (lead alloy) และการบัดกรี เพื่อเตรียมโลหะให้ติดกัน

2) เลดอะซิเตท (Lead acetate)

- เป็นส่วนผสมในน้ำยาข้อมผม ผลิตภัณฑ์สีข้อมผ้าฝ้าย สารเคลือบผิวโลหะ ใช้ในห้องปฏิบัติการ เป็นสารทำแห้งในผลิตภัณฑ์สี น้ำมันขัดเงา และหมึก ในทางสัตวแพทย์ใช้เป็นยาสมานแผล (astringent) และแก้ท้องเสีย

3) เลดอะซิเนต (Lead acenate)

ใช้เป็นสารกำจัดตัวอ่อนของแมลงชนิดต่างๆ เช่นแมลงที่กินต้นฝ้าย

4) เลดไนเตรท (Lead nitrite)

ใช้ผลิตวัตถุระเบิด หรือเป็นสารออกซิไดซ์สำหรับผลิตสีข้อม

5) เตตระเอทิลเลด และ เตตระเมทิลเลด (tetramethyllead)

เติมในน้ำมันเพื่อป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์

ก. การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วเกิดได้ทั้งโดยธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ การระเบิดของภูเขาไฟ และการสึกกร่อนของแหล่งแร่เป็นสาเหตุหลักของการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วที่เกิดโดยธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นรวมกันประมาณ 19,000 ตัน/ปี (Nriagu and Pacyna, 1989) การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วซึ่งเกิดจากการกระทำของมนุษย์อาจเกิดขึ้นได้จาก การทำเหมืองแร่ การผลิตสารประกอบของตะกั่ว รวมทั้งการผสมและปรุงแต่งผลิตภัณฑ์ และการแบ่งบรรจุ การเก็บรักษาและการขนส่ง รวมถึงการใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่ง เตตระเอทิลเลด สามารถออกจากสิ่งแวดล้อมได้โดยการแตกสลายด้วยแสง (photolysis) สำหรับในอากาศและน้ำผิวดิน แต่สำหรับการสูญสลายในน้ำใต้ดินและดินจะเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน ไม่พบรายงานการศึกษาการสูญสลายของสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

ง. ความเป็นพิษ

- ผลต่อสิ่งมีชีวิต ข้อมูลความเป็นพิษเฉียบพลันของสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว โดยการให้ทางปากมีจำกัดมาก เลดอะซิเตต มีพิษเฉียบพลันสูงมาก ในหนู(rat)มีค่า LD₅₀ เท่ากับ 80 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว และสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว มีพิษเฉียบพลันสูงมากโดยการฉีด LD₅₀ ของ เลดอะซิเตต และ เลดไนเตรท ในหนู(mouse) มีค่าเท่ากับ 189 และ 74 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ตามลำดับ สำหรับสารอนินทรีย์ของตะกั่ว พบว่า เตตระเมทิลเลด ในหนู (rat) มีค่าเพียง 105 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ในขณะที่ LD₅₀ ของ เตตระเอทิลเลด มีค่าถึง 12,300 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ในทางกลับกัน เตตระเอทิลเลด มีพิษเฉียบพลัน โดยการฉีดเข้าช่องท้องและฉีดเข้าเส้นเลือดสูงกว่า เตตระเมทิลเลด โดย LD₅₀ ของ เตตระเอทิลเลด มีค่าเท่ากับ 15 และ 14.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว สำหรับ LD₅₀ ของ เตตระเมทิลเลด มีค่าเท่ากับ 90 และ 88 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว นอกจากนี้ สารประกอบของตะกั่วยังมีผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีในร่างกาย โดยมีผลต่อระบบเลือด ทำให้เกิดภาวะเลือดจาง (lead – induced anemia) เป็นสารก่อมะเร็ง โดยเฉพาะมะเร็งไตในสัตว์ทดลอง มีความเป็นพิษต่อระบบประสาทส่วนกลาง ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า lead encephalopathy พบในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ มีอาการเบื้องต้นคือ ง่วงงม อาการรู้สึกรำคาญ เดินเซ ล้ม ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ กระสับกระส่าย และหงุดหงิด นอกจากนี้อาจมีอาการเยื่อหุ้มสมองอักเสบร่วมด้วย บวม น้ำ ตกเลือดภายใน (hemorrhage) ผู้ป่วยอาจเสียชีวิตได้จากการหมดแรง และระบบทางเดินหายใจล้มเหลว โดยมีอัตราการเสียชีวิตร้อยละ 25 (Hardman *et al.*, 1996; Gosselin *et al.*, 1984) นอกจากนี้อาจมีอาการระคายเคืองเบื้องต้น ส่งผลต่อการพัฒนาของตัวอ่อน ทางด้านระบบประสาทและระบบกล้ามเนื้อ มีความเป็นพิษต่อภูมิคุ้มกัน มีความผิดปกติในการสืบพันธุ์ และส่งผลต่อพฤติกรรมของมนุษย์หลายประการ Zenz และคณะ (1994) รายงานการศึกษาในคนงานที่สัมผัสกับตะกั่วในสถานที่ทำงาน และมีความเข้มข้นของตะกั่วในเลือดต่ำกว่า 80 ไมโครกรัม/100 มิลลิลิตร มีพฤติกรรมหลากหลาย เช่นหงุดหงิด อารมณ์เสีย เหนื่อยอย่างมากเมื่อเลิกงาน นอนหลับได้ค่อนข้างง่ายดายขณะดูโทรทัศน์ และไม่สนใจกิจกรรมบันเทิงยามว่าง ซึ่งเป็นผลต่อระบบประสาทส่วนกลางของตะกั่ว

- ผลต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม สำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำ สารประกอบตะกั่วมีความเป็นพิษเฉียบพลันในสัตว์น้ำแตกต่างกัน โดยทั่วไปสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่วมีพิษเฉียบพลันน้อยกว่าสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว LC₅₀ ของ เลดอะซิเตต สำหรับ water flea (*Daphnia magna*) มีค่าเท่ากับ 0.6 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในขณะที่ LC₅₀ ของ เตตระเอทิลเลด และ เตตระเมทิลเลด ในกุ้ง brown shrimp (*Crangon crangon*) มีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.11 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ ความกระด้างของน้ำมีผลต่อความเป็นพิษของสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว ถ้าความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นพิษเฉียบพลันของตะกั่วลดลง LC₅₀ ของ lead nitrate ที่ 48 ชั่วโมง ในปลาทองซึ่งเลี้ยงในน้ำที่มีความกระด้างเท่ากับ 0 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าเท่ากับ 6.6

และ 110 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งอธิบายได้ว่าการดูดซึมของโลหะต่างๆในน้ำโดยปลาต้องอาศัยกระบวนการเดียวกัน ถ้าในน้ำมีโลหะชนิดหนึ่งมากก็จะไปขัดขวางการดูดซึมของโลหะชนิดอื่นได้ เมื่อน้ำกระด้างมากขึ้น หมายความว่า ในน้ำมีโลหะชนิดต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียมมากจึงไปขัดขวางการดูดซึมของตะกั่ว ทำให้พิษของตะกั่วน้อยลง (Pickering and Henderson, 1966)

ข้อมูลความเป็นพิษเฉียบพลันของตะกั่วในสิ่งมีชีวิตบนบกมีจำกัดมาก สำหรับค่า LD₅₀ โดยการให้ทางปากของ เตตระเอทิลเลด ในเป็ด mallard duck (*Anas platyrhynchos*) และนก Japanese quail (*Coturnix japonica*) มีค่าเท่ากับ 107 และ 24.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัวตามลำดับ

2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำบางเขน

น้ำดิบ (Raw Material)

น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำ ของการประปานครหลวงมาจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่สถานีบึงน้ำสำแล จังหวัดปทุมธานี ห่างจากโรงผลิตน้ำ บางเขนประมาณ 18 กิโลเมตร ไปทางทิศเหนือ ประกอบด้วย อาคารบิ่ 3 หลัง ในแต่ละหลังใช้พื้นที่ 22 x 16 ตารางเมตร สูง 19 เมตร กำล้งสูบสูงสุด 4.3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันสู่คลองประปา น้ำดิบที่สูบจากคลองประปาจะถูกบิ่บโดยสถานีสูบน้ำบางเขนเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนซึ่งใช้บิ่บสูบแบบแนวตั้งกำล้งสูบ 348 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที 6 เครื่อง และบิ่บสูบแบบแนวตั้งกำล้งสูบ 174 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อีก 3 เครื่อง

การตกตะกอน (Clarification)

ขณะที่น้ำดิบถูกส่งผ่านคลองส่งสู่ส่วนตกตะกอน จะมีการใส่ปูนขาวระหว่าง 5-15 ppm เพื่อช่วยในการตกตะกอน จากนั้นน้ำจะถูกปล่อยสู่ถังรูปกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 58 เมตร จำนวน 16 ถัง ซึ่งออกแบบมาเพื่อการตกตะกอนในอัตรา 70 มิลลิเมตรต่อนาที และ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังเหล่านี้จะแบ่งเป็น 2 เขต คือ เขตถังทำปฏิกิริยากับถังตกตะกอน เขตถังทำปฏิกิริยาจะอยู่ตรงกลาง มีการเติมสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) และสารส้ม เขตที่เหลือเป็นถังตะกอน

การกรอง (Filtration)

น้ำที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน จะถูกนำมาผ่านเครื่องกรองเร็วแบบทราย-แอนทราไซต์ (Rapid Sand Anthracite) จำนวน 44 บ่อ แต่ในทางปฏิบัติจริงใช้เพียง 30-32 บ่อเท่านั้น ในแต่ละบ่อกรองมีขนาด 9.4 x 27.4 ตารางเมตร ซึ่งออกแบบสำหรับกรองน้ำเริ่มต้น 75,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อย่างไรก็ตามสามารถที่จะกรองได้สูงสุดถึง 120,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ผ่านชั้นถ่านแอนทราไซต์ หนา 80 เซนติเมตร และชั้นทรายคัดขนาด 40 เซนติเมตร

การเก็บน้ำ (Water Storage)

น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำ (Reservoir) ปูนขาว และคลอรีนที่เหลืออยู่จะถูกควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำดื่มของการประปานครหลวง

การลำเลียงและแจกจ่าย (Transmission and Distribution)

โรงงานผลิตน้ำประปบางเขนเป็นโรงผลิตน้ำ และจ่ายน้ำหลักของการประปานครหลวง โดยการจ่ายน้ำ และกระจายไปตามสถานีปั้มน้ำต่างๆ ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 – 3.4 เมตร แต่ละสถานีจะมีอาคารปั้มน้ำ ขนาด 13 x 69 ตารางเมตร สูง 12 เมตร ซึ่งเชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำ พื้นที่การใช้งานจะแบ่งเป็น 2 ระดับคือ ชั้นใต้ดิน (Basement) และชั้นบนดิน (Overground) ชั้นใต้ดินอยู่ลึกลงไปใต้ดิน 3 เมตร ประกอบด้วยปั้ม 5 ตัว ปั้ม 1 ตัวมีอัตราการส่งน้ำ 153 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อีก 4 ตัวมีอัตราการส่งน้ำ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ส่วนชั้นบนดินอยู่สูงขึ้นไป 9 เมตร มีการติดตั้งส่วนควบคุมปั้ม อุปกรณ์ไฟฟ้า และเครื่องมือปั้ม

บ่อตะกอน (Sludge Lagoon)

ตะกอน (Sludge) เป็นส่วนของน้ำตะกอนดินที่ตกตะกอนจากกระบวนการตกตะกอน และน้ำที่ใช้ล้างหัวกรอง ซึ่งจะถูกปั้มสูบบ่อตะกอน จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตากตะกอน เพื่อให้ตะกอนแห้งพอที่จะขนย้ายต่อไป โดยน้ำมีปริมาณประมาณ 30,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะถูกนำไปรีไซเคิล



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)

2.3 กลไกการกำจัดโลหะหนักของตะกอนสารส้ม

2.3.1 คุณลักษณะของตะกอนสารส้ม

ตะกอนสารส้มเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งในการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนใน 1 วัน จะมีปริมาณตะกอน 75,000 – 105,000 กิโลกรัมต่อวัน หรือประมาณ 75-105 ตันต่อวัน (การประปานครหลวง, 2555)

คุณสมบัติทั่วไปของตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา

1. อุดมด้วยสารอินทรีย์
2. ขาดสารอินทรีย์ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช
3. ขาดสารกลุ่มเส้นใย (fiber)
4. มีปริมาณสารอลูมิเนียมสูงกว่าดินทั่วไป สารอลูมิเนียมดังกล่าวได้มาจากการใช้สารส้มเป็นตัวตกตะกอน
5. ปริมาณมวลสารที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน
6. มีปริมาณตะกอนดิน ปริมาณมากเพียงพอที่จะเป็นวัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรม
7. ตะกอนดินมีคุณสมบัติเป็นเนื้อดินเบา อุ่นน้ำ จะพองตัวได้เมื่อชุ่มน้ำ

ตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปาไม่เหมาะสำหรับการใช้ถมที่โดยทั่วไป เนื่องจากคุณสมบัติของการเป็นเนื้อดินเบา พองตัวเมื่อชุ่มน้ำ ขาดสารอินทรีย์ ตะกอนดินนี้สามารถทำประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ 3 ลักษณะคือ

1. ปรุงแต่งด้วยอินทรีย์สาร หรือปุ๋ยในกลุ่มปุ๋ยหมักเพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยและแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับพืช ในประเทศญี่ปุ่นมีโครงการในลักษณะนี้กลายเป็นดินวิทยาศาสตร์ที่มีความต้องการของตลาด โดยเฉพาะตลาดปลูกไม้ดอก ไม้ประดับ

2. นำมาเป็นสารเติมแต่ง (additive) ในการปรับปรุงของเสีย (waste) หรือของเสียจากชุมชน หรือโรงงานน้ำตาลให้เป็นดินที่มีคุณภาพ ทั้งนี้เพราะ กากของเสียที่ผ่านการบำบัดของน้ำเสียชุมชน หรือโรงงานน้ำตาล จะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงเกินไป และบางครั้งส่งกลิ่นเหม็น เนื่องจากผ่านขบวนการหมักไม่สมบูรณ์ การนำกากตะกอนจากการผลิตน้ำประปารวมกับกากของเสียจากชุมชนหรือโรงงานน้ำตาลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

3. คุณสมบัติของตะกอนดินที่ขาดสารกลุ่มเส้นใย กากใยและขาดสารอินทรีย์ จึงมีความเหมาะสมในการนำ มาผลิตเป็นเครื่องปั้นดินเผา โดยที่ตะกอนดินดังกล่าวนี้มีปริมาณของมวลสารอลูมิเนียมผสมอยู่ได้ เครื่องปั้นดินเผาที่ได้ก็จะมีคุณภาพเฉพาะตัวของมันเองซึ่งไม่เหมือนการทำเครื่องปั้นดินเผาจากที่อื่นๆ (ชัยวัฒน์ วรพิบูลพงศ์, 2547)

2.3.2 เคมีของสารส้ม

2.3.2.1 การเกิดของตะกอนสารส้ม

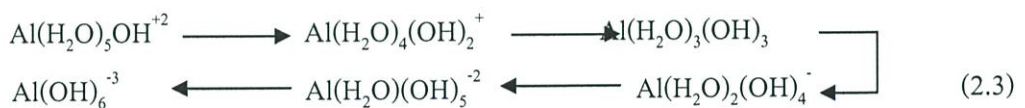
สารส้มที่ใช้ในการผลิตน้ำประปามีสูตรโมเลกุล $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ซึ่ง X มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 เมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวของไอออนบวกและลบ ดังสมการที่ 2.1 (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2537)



อลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำเรียกว่าอะควาเมทัลไอออน (Aqua metal ion) โมเลกุลของน้ำเรียกว่า ลิแกนด์ (ligand) เพื่อความสะดวกในการเขียน บางครั้งจึงตัดโมเลกุลของน้ำออกเหลือเพียง Al^{3+} เนื่องจาก Al^{3+} เป็นกรดซึ่งสามารถให้ H^+ จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed) ให้เป็นไอออนต่างๆของอลูมิเนียม ซึ่งมี OH^- , F^- หรือ SO_4^{2-} เป็นลิแกนด์



สมการ (2.2) เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งน้ำ 1 โมเลกุลของ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นต่อไปได้อีก ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่เพิ่มขึ้น ประจุบวกจะลดลงเรื่อยๆจนหมดและกลายเป็นประจุลบ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีลำดับดังนี้

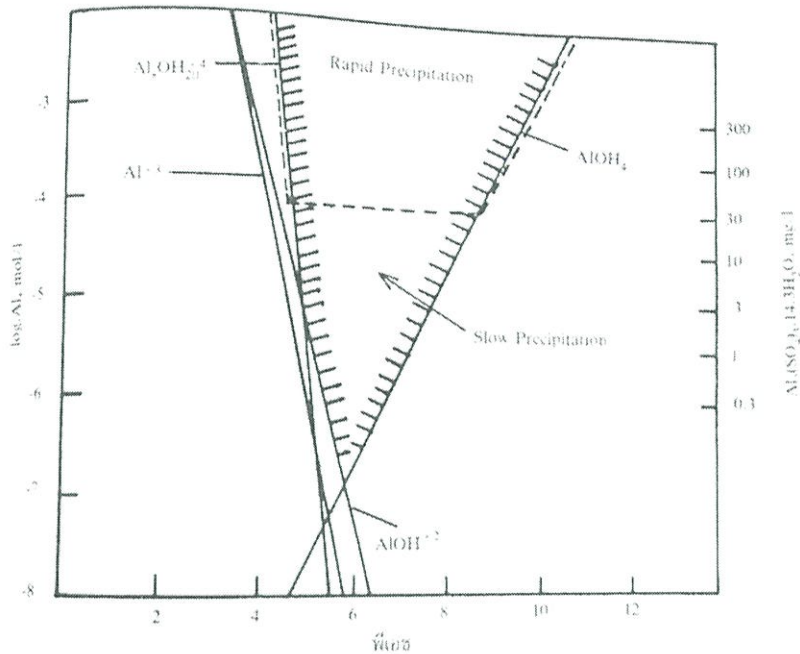


ไอออนคอมเพล็กซ์เป็นไอออนที่มีอลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว เรียกว่า โมโนเมอร์ริค ไฮโดรโซ คอมเพล็กซ์ (Monomeric Hydroxo Complex) สารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยาและรวมกันจนกลายเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่มีอลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอมซึ่งเรียกว่า โพลีเมอร์ริค ไฮโดรโซ คอมเพล็กซ์ (Polymeric Hydroxo Complex) เช่น $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_{18}(\text{OH})_{20}^{+4}$ และ $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$

สารประกอบเชิงซ้อนอาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero point of charge) ของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดสารเชิงซ้อนประจุลบ เช่น $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_5^{-2}$ ถ้า พีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดสารเชิงซ้อนประจุบวก เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_{17}^{+4}$ (Tchobanoglous *et al.*, 2003)

ในปัจจุบัน สารคอมเพล็กซ์ของอลูมิเนียมในน้ำที่อยู่ภายในสภาวะปกติของระบบประปา มี 4 ชนิด คือ Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$ และ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2537)





รูปที่ 2.2 Stability Diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น (มันลิน ตันฑุลเวศม์, 2537)

พื้นที่ภายในเส้นประเป็นบริเวณที่มีการตกผลึกของ Al(OH)_3 เกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นประแต่ยังแรงเอาไว้ มีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ

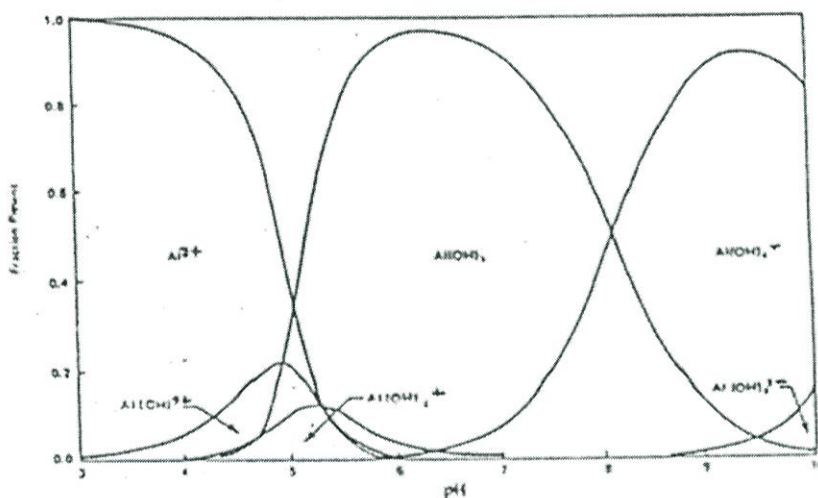
จากภาพเป็น Stability Diagram แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ ชนิดต่างๆ แสดงว่า เมื่อน้ำมีพีเอชต่ำ จะมี Al^{3+} มากที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดน้อยลง เมื่อพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลาง สารประกอบ Al(OH)_3 ซึ่งเป็นของแข็ง จะเกิดขึ้นมากกว่าไอออนอื่นๆ พื้นที่ในเขตที่แรงเอาไว้แสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ Al(OH)_3 ตามทฤษฎี พื้นที่ในเส้นประแสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ Al(OH)_3 ในทางปฏิบัติเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงของความเป็นด่าง ไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ ด้วยเหตุนี้การทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มให้กับน้ำตามธรรมชาติจึงควรมีพีเอชเป็นกลางหรือกรดเล็กน้อย น้ำไม่ควรมีพีเอชต่ำเนื่องจาก Al^{3+} ไม่ดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นแม้ว่าจะมีประจุบวกมากก็ไม่ดีเหมือนไอออนคอมเพล็กซ์อื่นที่มีประจุน้อยกว่าแต่ดูดติดผิวอนุภาคได้ น้ำไม่ควรมีพีเอชสูงเนื่องจากจะได้ไอออนที่มีประจุลบซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชันให้กับคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน

ตะกอนสารส้มที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการบำบัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์จะอยู่ในรูป Al(OH)_4^- , Al(OH)_5^{2-} , Al(OH)^{+2} , Al(OH)_{17}^{+4} และ Al(OH)_{34}^{+5} นอกจากนี้สารประกอบ

อลูมิเนียมดังกล่าวยังมีสารอนินทรีย์พวกดินเหนียว ทรายและคาร์บอน ซึ่งอาจชักนำให้เกิดการดูดซับโลหะหนักในกระบวนการดูดซับได้

2.3.2.2 กลไกการกำจัดโลหะหนักของตะกอนสารส้ม

ถ้าน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนัก ทำให้ตกตะกอนด้วยสารส้มที่เติมลงไป โดยที่มีการปรับสภาพของน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนเติมตะกอนสารส้ม จะทำให้ไอออนของไฮดรอกไซด์ร่วมกับไอออนของโลหะหนัก เกิดเป็นกลุ่มโลหะไฮดรอกไซด์ขึ้น (Wei Chu, 2542) ดังสมการ



รูปที่ 2.3 สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นของตะกอนสารส้มที่พีเอชต่างๆ (AWWA, 1992)

เมื่อเติมตะกอนสารส้มลงไป在水เสีย กลุ่มโลหะไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำให้ตกตะกอนพร้อมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่กำลังตกตะกอนและเกิดการดูดติดผิว (Adsorption) ของตะกอนสารส้ม (Alum sludge) ดังสมการ



ถ้าน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนัก ทำให้ตกตะกอนด้วยสารส้มที่เติมลงไป โดยไม่มีการปรับสภาพของน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนเติมตะกอนสารส้ม ไอออนของโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสียจะตกตะกอนด้วยผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ห่อหุ้มไอออนของโลหะหนักให้ตกตะกอนได้ ซึ่งเรียกว่าเป็นกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep Coagulation)

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพและเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) สมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้สมบัติอื่นๆของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่ต้องการออกมา โดยให้ถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นเมื่อดูดซับจนอิ่มตัวแล้วจึงสามารถนำเอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนแปลงสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพคือต้องการพื้นที่น้อย

2.4.1 ลักษณะการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ (ชัยยศ ตั้งสถิตสกุลชัย, 2554) คือ

ก. ระบบดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) มีแรงดึงดูดค่อนข้างอ่อน และเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรงสองชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ สามารถดูดซับโมเลกุลของสารได้หลายชั้น (multilayer adsorption) โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับหรือตัวถูกละลาย ทำให้มีค่าความจุต่อน้ำหนักสารดูดซับที่สูงกว่า จึงนิยมใช้ในระบบดูดซับสารเพื่อการแยก และการทำให้บริสุทธิ์ต่างๆ และที่สำคัญการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงนี้มีค่าน้อย การหลุดออกของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

ข. ระบบดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) แรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างสารดูดซับและพื้นผิวของสารดูดซับ ดังนั้นแรงดึงดูดจึงมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับทางกายภาพ และยังมีสภาพจำเพาะ (specificity) ของสารดูดซับต่อสารที่จะถูกดูดซับมากกว่าอีกด้วย เนื่องจากเป็นการดูดซับที่สร้างพันธะทางเคมี จึงมีการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับเท่านั้น (monolayer adsorption) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) แต่การดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้ (reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ ระบบดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

2.4.2 ประเภทของสารดูดซับ

สารดูดซับจำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการดูดซับนอกจากจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของรูพรุนได้แก่ ขนาด และการกระจายขนาดของรูพรุนแล้ว ยังขึ้นกับเคมีพื้นผิวของสารดูดซับอีกด้วย ซึ่งรวมถึงความเป็นขั้ว และหมู่ฟังก์ชันต่างๆ (surface functionality) ที่ปรากฏบนพื้นผิว สารดูดซับที่ใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ แบ่งตามคุณลักษณะได้ดังนี้

1. แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะโครงสร้าง (structural nature) ได้แก่
 - สารดูดซับอสัณฐาน (amorphous adsorbents)
 - สารดูดซับโครงสร้างผลึก (crystalline adsorbents)
2. แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (pore size distribution) ได้แก่
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 นาโนเมตร)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 นาโนเมตร)
3. แบ่งตามความเป็นขั้วของพื้นผิว (surface polarity) ได้แก่
 - สารดูดซับที่แสดงความเป็นขั้ว
 - สารดูดซับที่ไม่มีขั้ว
4. แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (chemical compositions) เช่น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบเป็นอะมิโนซิลิเกต ได้แก่ ซีโอไลต์ และแร่ดิน (clay adsorbents) พวกที่มี

องค์ประกอบของแกรไฟต์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอน โมเลกุลลาซีฟ หรือสารดูดซับเรซินที่มีองค์ประกอบของโพลิเมอร์เป็นต้น

2.4.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

ก. กลไกการดูดซับ กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน (Samuel and Osman, 1986)

1) การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

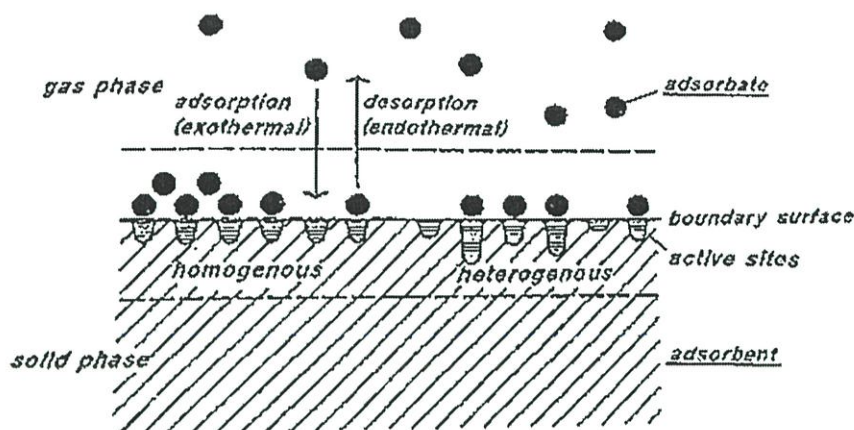
3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดติดที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้น แรงต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึง

ข. อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุม โดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายมี 3 ขั้นตอน คือ

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางตัวแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ผ่านของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราดูดซับเช่นเดียวกัน ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังตัวดูดซับ

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.4.4 การเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นตัวดูดซับ

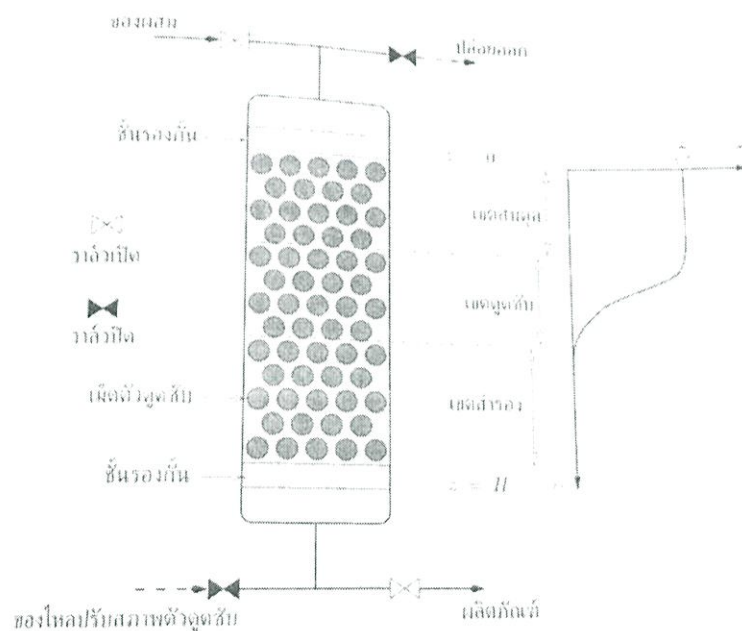
เมื่อสารถูกดูดซับเข้าสู่หน่วยดูดซับอย่างต่อเนื่อง สารถูกดูดซับส่วนหนึ่งจะแพร่ไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับตามกลไกการดูดซับที่อธิบายแล้วข้างต้น ในขณะที่สารถูกดูดซับส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่ถูกดูดซับ อัตราส่วนของสารถูกดูดซับที่แพร่ไปยังพื้นผิวตัวดูดซับแปรตามอัตราการดูดซับ และสมมูลดูดซับของตัวดูดซับที่บรรจุไว้ในหน่วยดูดซับ เมื่ออัตราการดูดซับเกิดขึ้นเร็วหรือสมมูลดูดซับมีค่าสูง สารถูกดูดซับส่วนใหญ่แพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับส่วนที่เหลือจึงลดลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในแนวทิศทางเดียวกับทิศของการเคลื่อนที่ด้วย ซึ่งมีผลให้เกิดการแพร่ในแนวขนานกับทิศของการเคลื่อนที่ ทิศทางการแพร่ตามแนวแกนของชั้นตัวดูดซับนี้จะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับผลต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตามแนวแกนของชั้นตัวดูดซับ นั่นคือ การแพร่เกิดขึ้นตามทิศของการไหล เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับลดลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ แต่การแพร่จะเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับทิศของการไหล เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ ดังนั้น อัตราการดูดซับจึงมีอิทธิพลต่อการกระจายความเข้มข้นตามแนวแกนของหน่วยดูดซับ นอกจากนี้ลักษณะสมมูลดูดซับในหน่วยดูดซับดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการกระจายความเข้มข้นตามแนวแกนของหน่วยดูดซับ หรือมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับภายในหน่วยดูดซับอีกด้วย ดังรายละเอียดต่อไป (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

หน่วยดูดซับทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง บรรจุตัวดูดซับสูง หน่วยดูดซับมีความหนาแน่น และชั้นตัวดูดซับมีความพรุนเฉลี่ย ในขณะที่หน่วยดูดซับทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซับออกจากของผสมที่กำลังไหลในหน่วยดูดซับนั้นและปล่อยผลิตภัณฑ์ออกทางปลายอีกด้านหนึ่ง

ของหน่วยดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ชั้นของตัวดูดซับในหน่วยดูดซับดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 เขต ตามความสูง (หรือความยาว) ของชั้นตัวดูดซับที่ประกอบด้วยเขตสมดุล เขตดูดซับ และเขตตำรอง ตามลำดับชั้นดังนี้

1) เขตสมดุล คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่ได้ดูดซับสารถูกดูดซับไว้ และปริมาณดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในชั้นนี้สมดุลกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับ ตัวดูดซับในเขตสมดุลนี้ได้ทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซับแล้ว และไม่สามารถทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซับได้ชั่วคราว เขตสมดุลนี้อยู่ในบริเวณด้านปลายของหน่วยดูดซับ (รูปที่ 2.5) ที่ให้ของผสมที่มีสารเจือปนไหลเข้าหน่วยดูดซับ นอกจากนี้เขตสมดุลนี้จะขยายกว้างขึ้นตามความสูง (หรือความยาว) ของหน่วยดูดซับ โดยจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับดังกล่าว

2) เขตดูดซับ คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่กำลังดูดซับสารถูกดูดซับ ในขณะที่สารถูกดูดซับดังกล่าวเคลื่อนที่ผ่าน จนกระทั่งปริมาณดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในเขตดูดซับนี้สมดุลกับความเข้มข้นของสารเจือปนในของผสมที่กำลังเคลื่อนที่ผ่าน เขตดูดซับนี้แทรกอยู่ระหว่างเขตสมดุลกับเขตตำรอง (รูปที่ 2.5) นอกจากนี้เขตดูดซับจะเคลื่อนที่จากปลายของหน่วยดูดซับที่ของผสมไหลเข้า ไปที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหน่วยดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ไหลออก



รูปที่ 2.5 การแบ่งเขตของชั้นตัวดูดซับของหน่วยดูดซับออกเป็น 3 เขต ประกอบด้วยเขตสมดุล เขตดูดซับ และเขตตำรอง ตามลำดับ ในขณะที่หน่วยดูดซับกำลังแยกสารเจือปนออกจากผลิตภัณฑ์ (เดชา นัทรศิริเวช, 2552)

3) เขตตำรอง คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่ไม่มีสารถูกดูดซับและอยู่ที่ส่วนด้านปลายของหน่วยดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ไหลออกจากหน่วยดูดซับดังกล่าว (รูปที่ 2.5) เขตตำรองนี้เป็นบริเวณของชั้นตัวดูดซับทดแทนเขตสมดุลที่ขยายกว้างขึ้น ความกว้างของเขตตำรองนี้จึงแปรผกผันกับความกว้างของเขตสมดุลของหน่วยดูดซับเดียวกัน

2.4.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area)

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2) ลักษณะของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate characteristics)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

3) อัตราเร็วของการปั่นกววน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรงซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นกววนสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4) เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด

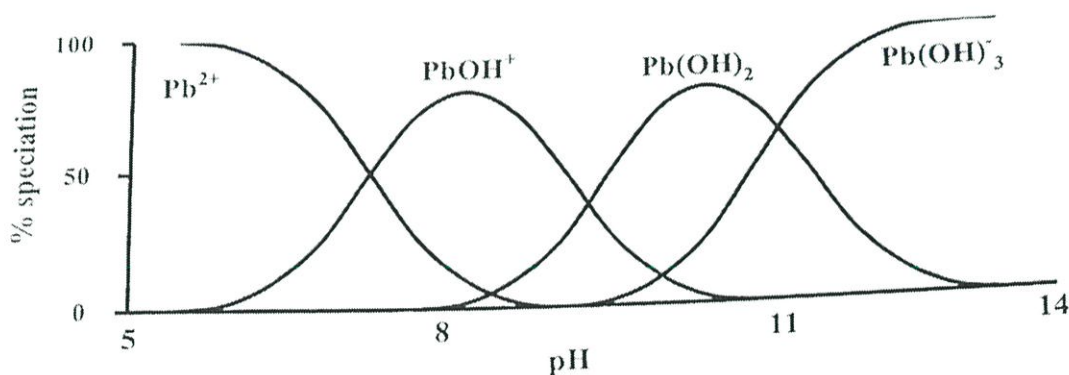
ของการดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

5) หมู่ฟังก์ชันที่ผิวตัวดูดซับ

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากความสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับ แล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้ เช่น หมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH) คาร์บอนิล (CO) หมู่เอมีน (NH_2) และหมู่ซัลเฟต (SO_3^-) ซึ่งเป็นประจุลบในสารละลาย สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักที่เป็นประจุบวกได้ (สุนิรัตน์ เรื่อง สมบูรณ์, 2549)

6) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักกลุ่มประจุบวกสอง (divalent ion) เช่น ตะกั่วในแหล่งน้ำ สามารถปรากฏอยู่ในรูปของไอออนอิสระ Pb^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำ หรือปรากฏในรูปการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ $\text{Pb}(\text{OH})_2$ หรือการรวมตัวกับเกลือต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2$ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นค่าพีเอช ของสารละลายจึงมีผลต่อการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนผิวตัวดูดซับด้วย แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันจะมีความสามารถและมีสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นกับค่า pK_a ของหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้น



รูปที่ 2.6 ค่าพีเอชของสารละลายต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ของตะกั่วในน้ำ (Schuthess and Huang, 1990)

2.5 การเคลื่อนตัวของตะกั่วภายในดิน

2.5.1 การเคลื่อนตัวของตะกั่วออกจากดินตะกอน

การเคลื่อนตัวของแร่ธาตุต่างๆ ออกจากดินตะกอนจะถูกนำพาโดยการไหลของน้ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีอยู่สามวิธีคือ (Selim and Iskandar, 1999)

- ละลายออกจากดินตะกอน และฟอร์มตัวเป็นแร่ธาตุในสารละลาย
- เคลื่อนตัวออกจากดินตะกอนในรูปของสารแขวนลอยที่เป็นของแข็ง และถูกนำพาไป

ในรูปของสารแขวนลอย

- ตกตัวเป็นตะกอนท้องน้ำ (bed load) อยู่ก้นแม่น้ำลำธาร

ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของดินตะกอนแขวนลอยนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของกระแส น้ำ และความเร็วของการตกตัว (settling velocity) ของอนุภาคแขวนลอยนั้นๆ

1) การเคลื่อนที่โดยการละลาย

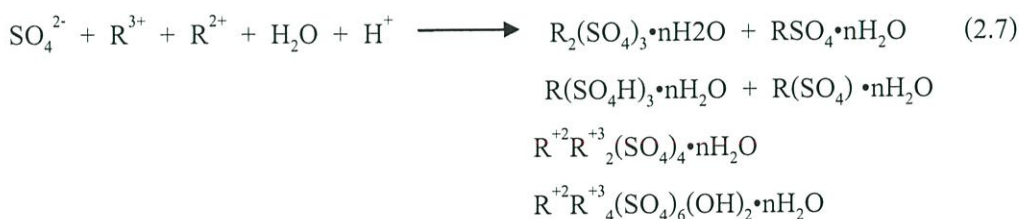
การละลายตัวจะขึ้นกับผลของค่าพีเอช จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายออกมาจากดินตะกอนจะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น นั่นคือมีความเป็นกรดลดลง

2) การเคลื่อนที่ในรูปของอนุภาค: สารแขวนลอยและดินตะกอนท้องน้ำ

เมื่อน้ำมีการไหลอย่างรวดเร็ว แร่ธาตุต่างๆทั้งในรูปละลายน้ำและรูปของอนุภาคจะถูกดึงให้เคลื่อนที่ออกจากที่ๆเคยอยู่ไปสู่ที่ไกลออกไป ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้เอง ทำให้เกิดซัลเฟตในรูปไม่ละลายน้ำ (insoluble sulfate) ออกไซด์ (oxides) และออกซิไฮดรอกไซด์ (oxyhydroxides) ส่วนธาตุเคลย์เช่นกาลิไนต์ (kaolinite) และคลอไรต์ (chlorite) จะเคลื่อนที่ไปกับธาตุในรูปละลายน้ำ ซึ่งตะกั่วจะไปสร้างพันธะกับซัลเฟตและซัลไฟด์ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (โดยการดูดซับ) และซิลิเกต (รวมไปถึงสารที่มีโครงสร้างผลึก สร้างพันธะโดยการดูดซับ)

เมื่อพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ลดลง แร่ธาตุจะแตกตัว ทั้งแร่ธาตุในรูปอนุภาคแขวนลอยและรูปละลายน้ำจะถูกพัดพาโดยน้ำและตกตัวด้วยกระบวนการรวมตะกอนและตกตะกอน (flocculation and coagulation) มีบางส่วนที่อาจตกตัวด้วยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีตัวแปรสำคัญได้แก่ น้ำที่มีความเป็นกรด น้ำที่ประกอบด้วยไบคาร์บอเนต น้ำที่มีความเข้มข้นของเกลือสูง อนุภาคคาร์บอเนต อนุภาคซิลิเกต และแร่ธาตุต่างๆ

แร่ธาตุต่างๆเช่น SO_4^{2-} , H^+ , Fe^{3+} , Al^{3+} และ Pb^{2+} เมื่อละลายน้ำจะทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดในทางแร่วิทยาของแร่ธาตุเหล่านี้คือองค์ประกอบของแร่ชนิดใหม่ๆ เช่น อะลูโนเจน (Alunogen) ที่มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ หรือ ฮาโลทริไคท์ (Halotrichite) $(\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O})$ เมื่อพิจารณาสมการต่อไปนี้



เมื่อ $\text{R}^{3+} = \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$ และ $\text{R}^{2+} = \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Mn}, \text{Cu}$ เป็นธาตุหลักกรวมกับ $\text{Pb}, \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Cd}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cr}$ จำนวนเล็กน้อย

รูปแบบอย่างง่ายนี้สะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการนี้ควรจะอยู่ภายใต้ 2 ปัจจัย คือ ความสามารถในการละลายน้ำในวัฏภาคผลึก และอัตราส่วนมวลสารของซัลเฟต จากสมการ ซัลเฟตตัวแรกอยู่ในรูปของผลึกที่ประกอบด้วยธาตุที่มีประจุสอง แต่เนื่องจากละลายน้ำได้ต่ำ จึงเกิดการฟอร์มตัวขึ้นเป็น $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (melanterite) ซึ่งค่อนข้างเสถียรที่พีเอชต่ำๆ ความสำคัญของแร่ธาตุเหล่านี้คือ $\text{Fe}(\text{II})$ sulfates เป็นสารตั้งต้นในการเกิด $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ในการเคลื่อนย้ายของตะกั่ว

หากน้ำชะวัสดุที่เป็นหินปูนซึ่งมี HCO_3^- สูง เมื่อน้ำนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำที่มีความเป็นกรด จะเกิดการตกตะกอนร่วมของไอร้อนคาร์บอเนต ($\text{Fe}_2(\text{CO}_3)$) และหากมีค่าพีเอชเหมาะสมอาจเกิดการตกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นตัวดูดซับตะกั่ว ดังสมการ



ตะกั่วในรูปละลายน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับ HCO_3^- เกิดการตกตะกอนในรูป $\text{Pb}(\text{CO})_3(\text{s})$



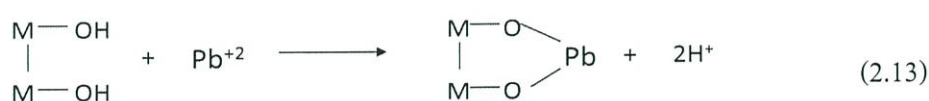
2.5.2 การดูดซับและการคายซับของตะกั่ว

การดูดซับและการคายซับของตะกั่วนั้นจะเกี่ยวข้องกับออกไซด์/ไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกอน ซึ่งมีความสำคัญมาก การดูดซับของตะกั่วบนพื้นผิวของแข็งจะเกิดการดูดซับบริเวณขอบ (Adsorption edge) กลไกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ โดยการเกิดสารเชิงซ้อน ซึ่งพื้นผิวของออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ เช่น MnO_2 สามารถดูดซับ Pb^{+2} ได้ดังสมการ

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation)



หรือ การเกิดคีเลต (chelation)



พีเอชมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาการดูดซับและคายซับ ที่พีเอชสูงๆ ($\text{pH} > 6$) ตะกั่วจะถูกไฮโดรไลซ์เป็น $\text{Pb}(\text{OH})^+$ และ $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ซึ่งสามารถถูกดูดซับได้โดยดินและบนโลหะไฮดรอกไซด์ แต่ที่ $\text{pH} < 3.0$ ตะกั่วเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของสารละลาย ที่พีเอชระหว่าง 3 และ 6 การดูดซับของตะกั่วจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น นี่จึงเป็นเหตุผลที่ว่ากระบวนการดูดซับตะกั่วคือสิ่งสำคัญในกรณีนี้ ตั้งแต่การเพิ่มขึ้นของพีเอชอันเนื่องมาจากการผสมกันระหว่างน้ำที่มีความเป็นกรด

กับคาร์บอนแอคทีฟที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ก่อให้เกิดการดูดซับหรือการคายซับของตะกั่วได้ นอกจากนี้ ตะกั่วสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในดิน และฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ต่ำ (Wild Alan, 1993)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การนำตะกอนสารส้มมากำจัดโลหะหนัก

ชลทิศ แก้วลี (พ.ศ.2547) ศึกษาเรื่องการจัดโลหะหนักโดยใช้ตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปามากำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ นิกเกิล โครเมียม และสังกะสี พบว่าการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณกากตะกอนสารส้ม 180 กรัมต่อลิตร พบว่าตะกอนสารส้มที่ค่าพีเอชน้ำเสีย 3 มีการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 84.00 ค่าพีเอชน้ำเสียที่ 3, 4 และ 5 มีการกำจัดโครเมียมร้อยละ 76.30, 84.55 และ 100 ตามลำดับ และค่าพีเอชน้ำเสียที่ 3, 4 และ 5 มีการกำจัดสังกะสีร้อยละ 65.54, 66.01 และ 67.67 ตามลำดับ การกำจัดโลหะหนักโดยตะกอนสารส้มดังกล่าวเป็นไปโดยกลไกการห่อหุ้ม (Sweep coagulation) และกลไกการตกตะกอนแบบดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

ชนิดา สีหาโมก (พ.ศ. 2553) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก จากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยใช้ตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา โดยศึกษาโลหะหนัก 3 ชนิดคือ เงิน โครเมียม และตะกั่ว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลงเมื่อพีเอชของน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น พีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด คือที่พีเอช 3 ที่ปริมาณกากตะกอนสารส้ม 200 กรัมต่อลิตรสำหรับเงินและโครเมียม และ 160 กรัมต่อลิตรสำหรับการกำจัดเหล็ก มีประสิทธิภาพการกำจัดเงิน โครเมียม และเหล็ก ร้อยละ 93.77, 96.02 และ 98.90 ตามลำดับ สำหรับการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนน้ำเสียซีไอดีหลังการทำให้เป็นก้อนแข็ง (solidification) พบว่าที่พีเอช 4.5 จะมีปริมาณการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนตัวอย่างมากที่สุด และการทำเสถียรกากตะกอนโดยกำหนดสัดส่วนกากตะกอนสารส้ม/ปูนซีเมนต์เท่ากับ 20:80 โดยปริมาตรมีความเหมาะสม เนื่องจากทำให้ปริมาณเงิน โครเมียม เหล็ก และอลูมิเนียมในน้ำชะละลายผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดิน

Wei Chu (ค.ศ.1999) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย พบว่า พีเอช ที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนเคมีคือ 11.6 และเมื่อมีการใช้ตะกอนสารส้มแบบเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Recycled alum sludge, RAS) ในกระบวนการสร้างตะกอน ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 79 เป็น ร้อยละ 96-98 เมื่อใช้ RAS 100-180 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับตะกอนสารส้มสด (Fresh alum sludge, FAS) พบว่าใช้ FAS ลดลง จาก 175 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือเพียง 50-12.5 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น ถ้าหากไม่ได้ใส่ FAS RAS จะสามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 94 เมื่อใช้ในปริมาณ 75-100 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามหากไม่คำนึงถึงการปรับสภาพอลูมิเนียมด้วยการเติมประจุ

แล้วที่พีเอช 10.5 ก็สามารถใช้ได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายเรื่องการปรับสภาพพีเอชได้อีกด้วย

M.A. Zazouli และคณะ (ค.ศ. 2008) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำชะขยะโดยใช้กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน กำจัดโลหะหนัก 5 ชนิด คือ สังกะสี นิกเกิล โครเมียม ทองแดง และแคดเมียม และเปรียบเทียบการใช้สารรวมตะกอนระหว่างสารส้ม และ เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ คือ 6.5 และ 10.0 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณสารส้ม 1.4 กรัมต่อลิตร และปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.0 กรัมต่อลิตรจึงเหมาะสม เฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและโลหะหนัก เท่ากับ ร้อยละ 68-85.5 และ ร้อยละ 28 ตามลำดับ ในขณะที่สารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและโลหะหนัก เท่ากับ ร้อยละ 77-91 และ ร้อยละ 21 อย่างไรก็ตาม ในเชิงประสิทธิภาพพบว่าสารส้มกำจัดได้ดีกว่าเฟอร์ริกคลอไรด์ แต่หากมองในเชิงเศรษฐกิจแล้วใช้เฟอร์ริกคลอไรด์จะเหมาะสมกว่าเพราะใช้ปริมาณน้อยกว่า

Bonzongo และ Hovsepyan (ค.ศ. 2009) ศึกษาการนำตะกอนที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำดื่ม (AI-WTRs) มาเป็นตัวดูดซับปรอท โดยใช้การทดลองการดูดซับแบบแบทช์ และใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในการพิจารณา พบว่าความจุในการดูดซับปรอทสูงสุดคือ 79 mg Hg/g AI-WTRs จลนศาสตร์ในการดูดซับเป็นแบบอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order) ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 3-8 และเมื่อพิจารณาลักษณะของตะกอน พบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 18 m^2/g และมีรูพรุนบริเวณพื้นผิว 120 m^2/g ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนปรอทได้

Zhou และ Haynes (ค.ศ. 2011) ศึกษาการดูดซับแบบครั้ง (Batch Adsorption) ของตะกั่ว (II) โครเมียม (III) และ โครเมียม (VI) จากสารละลายโดยใช้ตะกอนสารส้มจากโรงผลิตน้ำประปา และตะกอนสารส้มจากโรงผลิตน้ำประปาผสมถ่านกัมมันต์ ลักษณะการดูดซับของตะกอนทั้งสองแบบค่อนข้างคล้ายคลึงกัน ไอโซเทอร์มการดูดซับที่เหมาะสมคือสมการของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนลิช (Freundlich) นอกจากนี้พบว่าโครเมียม (III) มีความจุในการดูดซับสูงสุดและดัชนีความแรงของการดูดซับมากกว่า ตะกั่ว (II) และ โครเมียม (VI) ตามลำดับ จลนศาสตร์ในการดูดซับเป็นแบบอันดับสองเทียม (pseudo second order) ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การดูดซับทางเคมี เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 และ 6 ทำให้การดูดซับของโครเมียม (III) และตะกั่ว (II) เพิ่มขึ้นเป็น 30% - 100% ในขณะที่การดูดซับของโครเมียม (VI) ลดลง การนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ทำได้โดยการล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 M ซ้ำทั้งหมด 8 ครั้ง อย่างไรก็ตามตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับตะกั่วและโครเมียมเพราะมีราคาถูก

2.6.2 การนำตะกอนสารส้มกลับมาใช้ประโยชน์

Y.Q. Zhao และคณะ (ค.ศ. 2008) ศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของการใช้กากตะกอนสารส้มเป็นสารตั้งต้นในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ Reed bed ในลักษณะการไหลในแนวนอนและแนวตั้ง โดยแนวนอนจะปลูกต้นอ้อเล็ก (*Phragmites australis*) คลุมไว้ ในขณะที่แนวตั้งจะไม่ปลูกพืช งานวิจัยนี้ครอบคลุมถึงความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนพื้นที่ผิว และความเป็นไปได้ในการปล่อยสารบางตัวจากตะกอน เช่น Al^{3+} จากการศึกษาพบว่าโมเดลแบบแนวตั้ง (ไม่ปลูกต้นไม้) สามารถยับยั้งการชะของฟอสฟอรัสได้ 99.5% ลดค่าซีโอดีได้ 25% และโมเดลแนวนอนกำจัดบีโอดี ได้ 78%, ซีโอดี 82% และของแข็งแขวนลอย 93% ภายใต้การควบคุมค่าการกักเก็บน้ำ (HRT) $0.80 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ มีความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงถึง 92% ที่อัตราการไหล $21.5 \text{ g-PO}_4^{3-}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ จากการเดินระบบนานถึง 193 วัน และมี Al^{3+} ถูกปล่อยออกมา $0.03\text{-}0.11 \text{ mg/L}$ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานถือว่าไม่มีนัยสำคัญ แม้ว่าจะไม่มีปัญหาในการเดินระบบ เช่น การชะของ Al^{3+} หรือการอุดตัน แต่การศึกษาในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ฟอสเฟต และของแข็งแขวนลอยเพิ่มจาก 68.5%, 67.1%, 90.5% และ 89.5% เป็น 77.7%, 82.1%, 91.8% และ 92.8% ตามลำดับ

Xu และ Wang (ค.ศ. 2009) ได้ทำการศึกษาการนำสารส้มจากตะกอนระบบผลิตน้ำกลักลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT) พบว่า สามารถทำได้โดยการเติมกรดซัลฟิวริกในสารละลาย ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการแยกสารส้มออกจากตะกอนระบบผลิตน้ำดิบเท่ากับ 2.5 และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกวนผสมสำหรับดินตะกอนน้ำดิบ คือ 30 นาที

Y.Q. Zhao และ Y. Yang (ค.ศ. 2010) ศึกษาการนำตะกอนสารส้มกลับมาใช้ใหม่ในการดักจับฟอสฟอรัสในน้ำเสีย โดยเปรียบเทียบความจุของการดูดซับของตัวอย่างตะกอนสารส้มจากโรงงานบำบัดน้ำเสียสองแห่งในกรุงดับลิน ไอร์แลนด์ คือ Ballymore-Eustace และ Leixlip พบว่ามีความจุในการดูดซับเท่ากับ $14.3 \text{ mg P/g sludge}$ และ $13.1 \text{ mg P/g sludge}$ ตามลำดับ โดยข้อดีของการใช้ตะกอนสารส้ม คือมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามหากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟอสเฟตในปริมาณที่มากขึ้น ควรจะทำการศึกษาความจุของการดูดซับของตะกอนสารส้ม เนื่องจากคุณภาพของน้ำดิบจะมีผลกระทบต่อลักษณะของตะกอนและมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับ

Y. Yang และคณะ (ค.ศ. 2011) ศึกษาการใช้ตะกอนสารส้มกำจัดซีโอดี บีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากน้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ระบบเวทแลนด์แบบอนุกรม (a laboratory-scale multi-stage constructed wetland, CW) ใช้การป้อนน้ำเสียโดยปล่อยน้ำให้ไหลลงมา (tidal flow) เพื่อเพิ่มโอกาสในการเติมอากาศให้ระบบเพื่อกระตุ้นให้สารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษและไนโตรเจนเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ดำเนินการร่วมกับการ

ปล่อยน้ำแบบเป็นขั้น (Step feed) เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนสำหรับการเกิดดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) มีอัตราภาระน้ำเข้า (HLR) 1.0 และ 1.26 m³/m².d ผลปรากฏว่า ตะกอนสารส้มทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัส จึงสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ ในขณะเดียวกันก็มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และสารอินทรีย์สูง สังเกตได้จากการที่มีแบคทีเรียเจริญเติบโตบนผิวหน้าของตะกอนสารส้ม นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี บีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส 12.3%, 67.8 ± 9.2%, 33.6 ± 17.0% และ 99.5 ± 0.49% ตามลำดับ

D. Sirisha และคณะ (ค.ศ. 2012) ศึกษาการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) โดยใช้ตะกอนสารส้มเป็นตัวดูดซับ พบว่า สามารถดูดซับได้ 100% ที่ความเข้มข้นต่ำๆ และ 89% ที่ความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งการศึกษาจะพิจารณาเวลาสัมผัส (contact time) ขนาดของอนุภาค ความเข้มข้นเริ่มต้น และ ปริมาณตะกอนสารส้ม พบว่า เวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 50 นาที และเปอร์เซ็นต์การกำจัด SO₂ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกลง จะสามารถกำจัด SO₂ ได้มากขึ้น และเมื่อก่อยๆเพิ่มปริมาณตะกอนสารส้ม พบว่า SO₂ จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา และ ปฏิกิริยาจะดำเนินช้าลงเมื่อปริมาณตะกอนสารส้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักสมมูล (ระหว่างตะกอนสารส้มและ SO₂)

Y.Q. Zhao และคณะ (ค.ศ. 2012) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ โดยการป้อนน้ำเสียให้ไหลผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุตะกอนสารส้ม (Dewatered Alum Sludge: DAS) สูง 60 เซนติเมตร จำนวน 4 คอลัมน์ ซึ่งต่อเรียงกันแบบอนุกรม ปริมาณไนโตรเจนเข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ย 19.1 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน 83% ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนคือ การปล่อยน้ำแบบขั้น (Step-feeding) รวมทั้งการป้อนน้ำให้ไหลเข้าด้านบน (Up flow) ทำให้สภาพแวดล้อมภายในคอลัมน์ เหมาะสมที่จะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860
2. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AUX220
4. เครื่องดูดความชื้น (Desiccator) พร้อมสารดูดความชื้น
5. เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ TOKYO RIKAKIKAI
6. บล็อกฮีทเตอร์ (Block heater)
7. Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น AAS-200
8. ตู้อบ (Drying Oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP
9. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ยี่ห้อ Fisher Scientific
10. เครื่องบดดิน ยี่ห้อ BOSCO พร้อมตะแกรงแยกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร
11. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
12. แผ่นกรองรูพรุน (Syring filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
13. เครื่องแก้ว
14. อุปกรณ์สำหรับไทเทรต
15. ขวดพลาสติกใส่สารตัวอย่าง

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
2. ซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) จาก Fisher Scientific ชนิด Analytical reagent grade
3. 1,10-ฟีแนนโทรีน โมโนไฮเดรต ($C_{12}H_{18}N_2H_2O$) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
4. ไอรอน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) จาก Ajax Finechem ชนิด Laboratory reagent grade

5. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade โปแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) จาก Fisher Scientific ชนิด Analytical reagent grade
6. เลด (II) ไนเตรท ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) จาก Ajax Finechem ชนิด Laboratory reagent grade
7. เมอร์คิวรี (II) ซัลเฟต (HgSO_4) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
8. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ($\text{Conc. H}_2\text{SO}_4$) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
9. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc. HNO_3) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
10. อลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
11. โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
12. สารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1,000 ppm จาก BDH ชนิด AAS grade
13. น้ำกลั่น
14. น้ำตาลทรายขาว ยี่ห้อ มิตรผล

3.2 ลักษณะตะกอนและน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 การเตรียมดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

นำดินตะกอนที่เก็บจากลานตากตะกอนของโรงผลิตน้ำบางเขนในเดือน พ.ค. 2555 และตะกอนจากเครื่องรีดตะกอนของโรงผลิตน้ำสามเสน ซึ่งเก็บในเดือน พ.ค. 2556 มาทำให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลมให้แห้ง (Air dried) แล้วบดดินตะกอนที่แห้งด้วยเครื่องบดดิน ร่อนดินที่บดด้วยตะแกรงขนาด 0.5 เซนติเมตร จะได้ตัวอย่างดินสำหรับบรรจุคอลัมน์ที่ 2 และ 3 สำหรับดินตะกอนผสมสารส้ม เตรียมได้โดยละลายอะลูมิเนียมซัลเฟตเข้มข้น 120 mg/L ผสมกับนำดินตะกอนที่ผ่านการทำให้แห้งและบดแล้ว ในอัตราส่วนดินตะกอนต่อสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต 1.35: 1 โดยมวลต่อปริมาตร แช่ทิ้งไว้ 3 คืน นำไปทำให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลม จะได้ดินตะกอนผสมสารส้ม ที่มีสารส้มเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวอย่างดินสำหรับบรรจุในคอลัมน์ที่ 4 และ 5

3.2.2 การเตรียมน้ำเสีย

เก็บน้ำเสียจากคุุระบายน้ำบริเวณหลังหอพักนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (grab sampling) กำหนดจุดเก็บ 1 จุดที่พิกัด 13.729967

°N, 100.773565°E โดยเก็บทุกสองสัปดาห์ ครั้งละ 60 ลิตร นำมาเติมสารละลายตะกั่วไนเตรท สารละลายซุโครส (น้ำตาลทราย) และสารละลายฟอสเฟต เพื่อให้น้ำเสียมีความเข้มข้นตะกั่ว 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และซีโอดี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับใช้ในการ ทดลอง (วิธีการคำนวณดังภาคผนวก ก)

3.2.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย

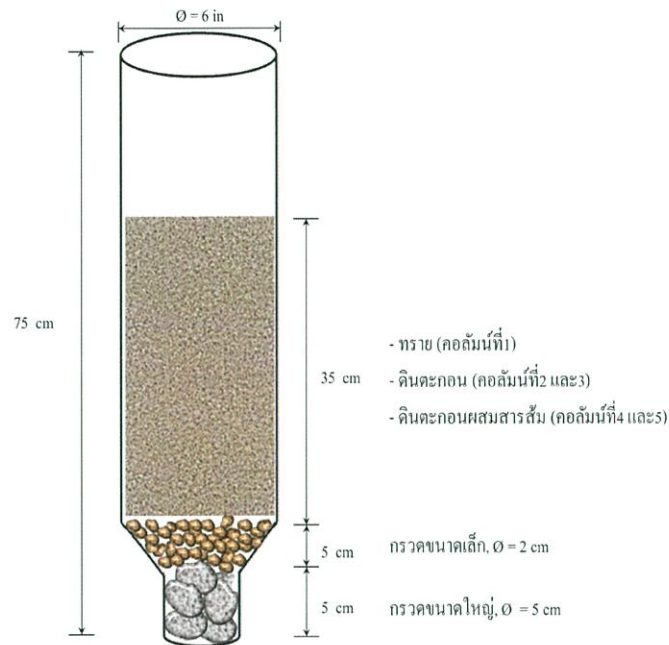
น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ถึงสมบัติบางประการ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำการทดลองและเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการ/ เครื่องมือวิเคราะห์
1. ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
2. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)
3. ซีโอดี	รีฟลักซ์แบบปิดและไทเทรต (5220 C; AWWA, 2012)
4. ปริมาณตะกั่ว	ย่อยด้วยกรดไนตริก (3111 B; AWWA, 2012)
5. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS)	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส (2540 D; AWWA, 2012)

3.3 การเตรียมคอลัมน์

คอลัมน์ที่ใช้ทำจากท่อพีวีซี (PVC) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.24 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตรจำนวน 5 ท่อ ประกอบด้วยคอลัมน์ควบคุมและคอลัมน์ตัวอย่างจำนวน 4 ท่อ สำหรับคอลัมน์ตัวอย่าง ภายในบรรจุกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 5 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร และดินตะกอนน้ำหนัก 6.58 กิโลกรัม สูง 35 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับคอลัมน์ควบคุม ทำเช่นเดียวกับคอลัมน์ตัวอย่าง เปลี่ยนจากดินตะกอนมาเป็นทรายขนาดอนุภาค 0.05-2.00 มิลลิเมตร แทน การบรรจุคอลัมน์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การบรรจุคอลัมน์

3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย

ในการทดลองจะปล่อยน้ำเสียเข้าคอลัมน์แบบเป็นครั้ง (batch) โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อนเข้าและออกจากคอลัมน์ทุกๆ สัปดาห์ จำนวน 2 ตัวอย่างต่อหนึ่งคอลัมน์ นำไปวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณตะกั่วในน้ำตัวอย่าง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำเสีย ดังรูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิจัยแล้วต้องนำผลมาวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ แบ่งส่วนการวิเคราะห์ดังนี้

3.5.1 สถิติพรรณนา

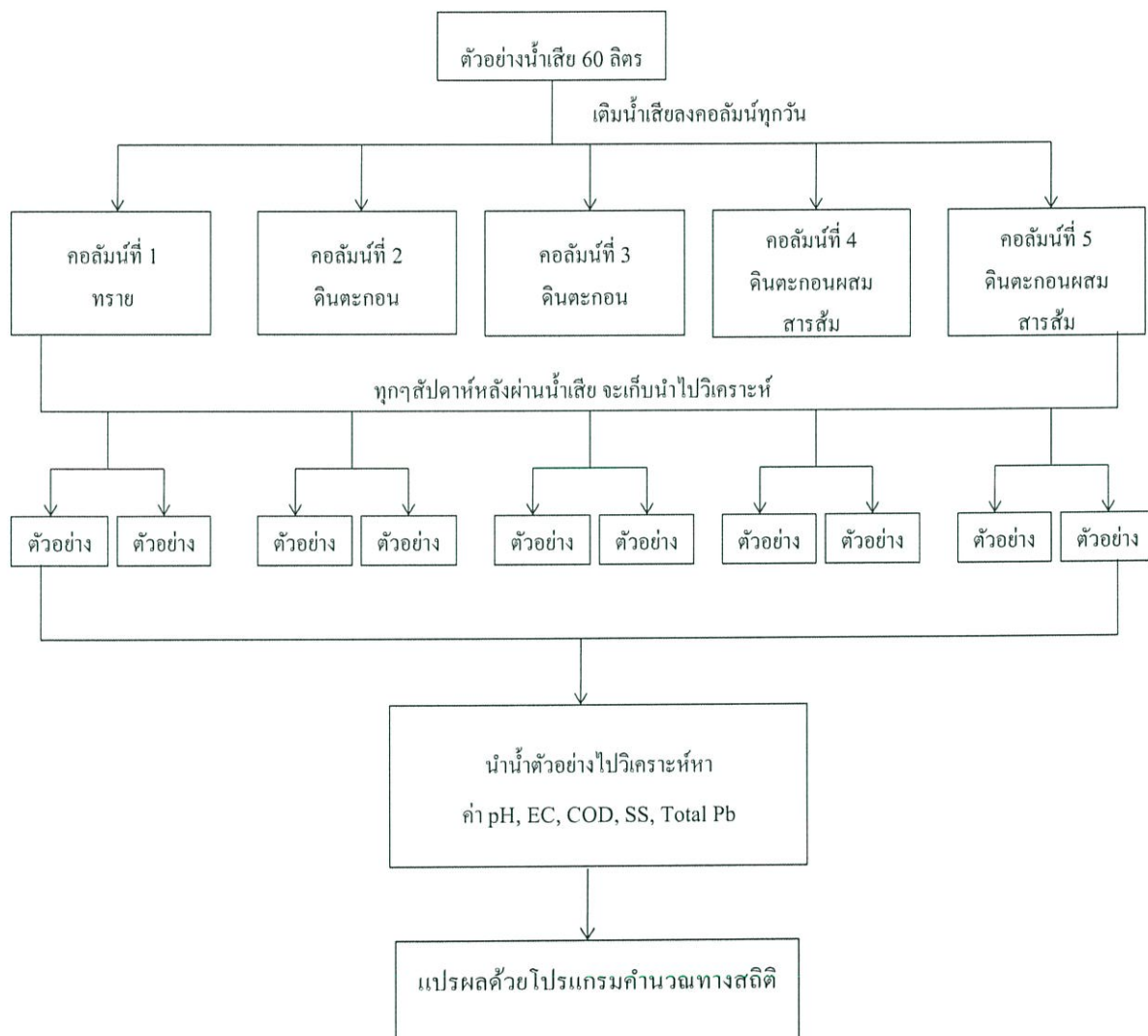
- ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพีเอช ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม
- ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดิน ตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

3.5.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

โดยการทดสอบหาค่า Homogeneity of Variance ว่ามีความแปรปรวนต่างกันหรือไม่ โดยถ้าไม่มีความแตกต่างกันก็จะใช้ One-way Analysis of Variance และถ้ามีความแปรปรวน

แตกต่างกันก็ใช้ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance เพื่อทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพของตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ที่คอลัมน์ต่างๆกัน

3.5.3 กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำดินตะกอนมาศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียบริเวณหอพักนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนำน้ำเสียมาผ่านคอลัมน์ทั้งสามได้แก่ คอลัมน์ทราย คอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม เป็นเวลาทั้งหมด 71 วัน ทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำทั้งก่อนและหลังผ่านคอลัมน์

4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว

ทำการศึกษาปริมาณตะกั่วในน้ำเสีย ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริก และวัดปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอซชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ที่ความยาวคลื่น 217.00 นาโนเมตร นำค่าที่ได้ไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด จากตารางที่ 4.1 พบว่า ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยที่ออกมาจากคอลัมน์หลังจากผ่านน้ำเสียสำหรับคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 0.204, 0.119 และ 0.107 mg/L ตามลำดับ นำมาคำนวณเป็นประสิทธิภาพการกำจัดได้ 98.31%, 99.01% และ 99.09% สำหรับคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกคอลัมน์มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.1) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความแตกต่างด้วย Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า เมื่อวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากตะกั่วอาจรวมตัวกับเกลือต่างๆที่อยู่ในน้ำฟอร์มตัวอยู่ในรูป $Pb(NO_3)_2$ และ $Pb(CO_3)_2$ หรือฟอร์มตัวกับฟอสเฟตในน้ำในรูป $Pb_3(PO_4)_2$ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ(ชัยยศ ตั้งสถิตสกุลชัย, 2554) และถูกกำจัดในเบื้องต้นโดยการกรองผ่านชั้นผิวหน้าของทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกันมากนัก ในทางทฤษฎีพบว่า ดินตะกอนสามารถกำจัดตะกั่วได้ ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) และกระบวนการดูดซับทางเคมี (ชลทิศ แก้วลี, 2547; Wei Chu, 1999) จากการทดลองแบบครั้งพบว่า อนุภาคทรายสามารถจับกับตะกั่วได้เพียงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเพียง 20.07% ในขณะที่คอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 86.65% และ 83.68% ตามลำดับ ดังนั้น การที่ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของแต่ละคอลัมน์ไม่แตกต่างกันมากนัก อาจเกิดจากสภาวะในคอลัมน์ไม่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดกระบวนการดูดซับทางเคมี

อย่างไรก็ตามคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด โดยเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเห็นได้ชัด อาจเป็นเพราะว่า ระยะเวลาในการทำการทดลองน้อยเกินไปคือเพียง 71 วัน ดังการศึกษาที่ Zhao และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัดซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย และฟอสเฟต โดยใช้ดินตะกอนผสมสารส้มในรูปแบบคอลัมน์ พบว่า เมื่อทำการทดลองผ่านไป 140 วัน ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชพบว่า น้ำที่ผ่านการกำจัดในแต่ละคอลัมน์มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น จาก 6.47 เป็น 7.22, 7.26 และ 7.39 สำหรับคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ตามลำดับดังตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการกำจัด ค่อนข้างสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทั้งสาม คือเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำๆ ($\text{pH} < 3$) ตะกั่วจะอยู่ในรูปไอออน (Pb^{2+}) ในสารละลาย แต่ที่พีเอชสูงๆ ($\text{pH} > 6$) ตะกั่วจะถูกไฮโดรไลซ์อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ($\text{Pb}(\text{OH})^+$ หรือ $\text{Pb}(\text{OH})_2$) และสามารถถูกดูดซับบนดินหรือบนโลหะไฮดรอกไซด์ได้ ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Wild Alan, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhou Ya-Feng และ Haynes Richard (2011) ที่ศึกษาการดูดซับตะกั่วและโครเมียมบนดินตะกอน พบว่า เมื่อแปรผลค่าพีเอชระหว่าง 3-6 ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้น จาก 30% - 100%

ตารางที่ 4.1 ปริมาณตะกั่วและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

คอลัมน์	ปริมาณตะกั่วก่อนผ่าน คอลัมน์ (mg/L) (เฉลี่ย, SD)	ปริมาณตะกั่วหลังผ่าน คอลัมน์ (mg/L) (เฉลี่ย, SD)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%เฉลี่ย, SD)
ทราย	15.826 ± 8.91	0.204 ± 0.18	98.31 ± 1.69 (N = 10)
ดินตะกอน	15.826 ± 8.91	0.119 ± 0.07	99.01 ± 0.87 (N = 10)
ดินตะกอนผสม สารส้ม	15.826 ± 8.91	0.107 ± 0.08	99.09 ± 0.92 (N = 10)

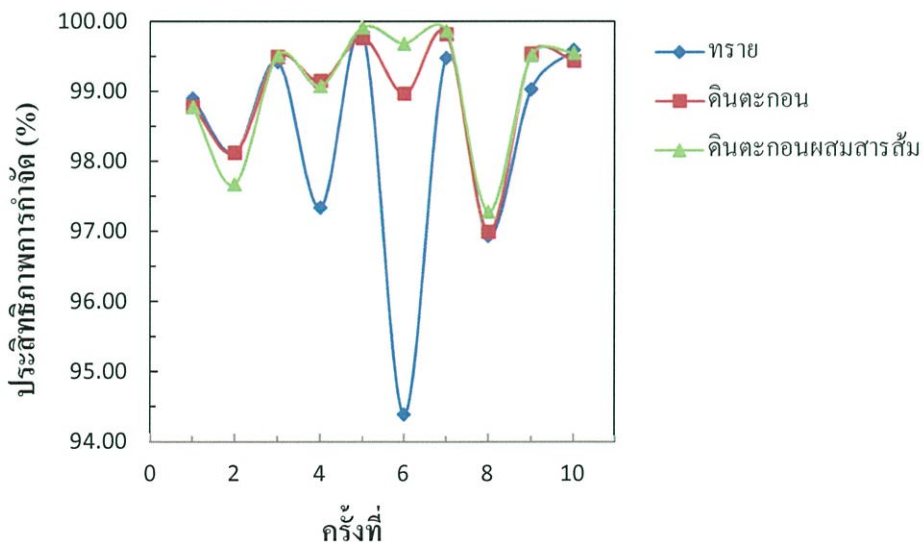
ตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชของน้ำเสียทั้งก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

คอลัมน์	ค่าพีเอชก่อนผ่านคอลัมน์ (เฉลี่ย, SD)	ค่าพีเอชหลังผ่านคอลัมน์ (เฉลี่ย, SD)
ทราย	6.47 ± 1.24	7.22 ± 0.19 (N = 20)
ดินตะกอน	6.47 ± 1.24	7.27 ± 0.40 (N = 40)
ดินตะกอนผสมสารส้ม	6.47 ± 1.24	7.40 ± 0.48 (N = 40)

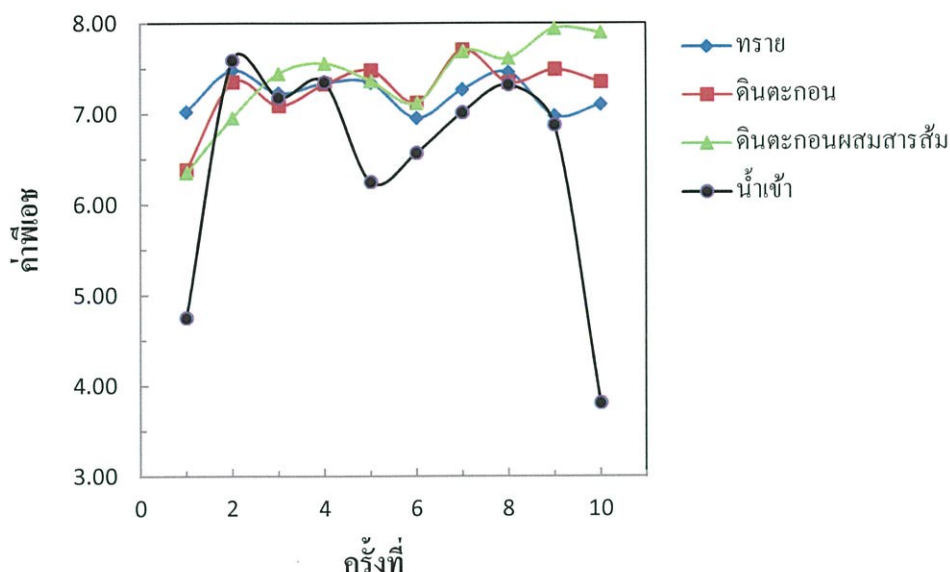
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในคอลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance

คอลัมน์	N	Mean Rank	Chi-Square	df	Asymp.Sig
ทราย	10	12.60			
ดินตะกอน	10	15.80	1.969	2	.374
ดินตะกอนผสมสารส้ม	10	18.10			
รวม	30				

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม



รูปที่ 4.2 ค่าพีเอชของน้ำเสียก่อนผ่านคอลัมน์ และน้ำเสียหลังผ่านคอลัมน์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

จากผลการศึกษาซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิดพบว่า แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ดินตะกอนและคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้มมากกว่าคอลัมน์ทรายตามลำดับคือ 50.65%, 50.58% และ 32.09% ดังตารางที่ 4.3 สารอินทรีย์บางส่วนจะถูกกำจัดเบื้องต้นโดยการกรอง (Zhao *et al.*, 2008) ในวันที่ 2 น้ำออกมีค่าซีโอดีสูงกว่าน้ำเข้าคอลัมน์ (มีค่าคิดลบ) (รูปที่ 4.3) เนื่องจากเป็นวันแรกของการทำการทดลอง อนุภาคดินและทรายมีความเป็นรูพรุนสูงเพราะไม่มีน้ำผ่าน ทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างดินกับน้ำเสียน้อย น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ลงมาอย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพการกำจัดจึงไม่ดี ในวันต่อมา ประสิทธิภาพการกำจัดจึงดีขึ้นตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่า คอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าคอลัมน์ทราย อาจเกิดจากการผ่านน้ำเสียเข้าคอลัมน์แต่ครั้งมีโอกาที่สารอินทรีย์จะสะสมอยู่ในคอลัมน์ ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำผ่านเข้าไปในคอลัมน์ หากมีระยะเวลาสัมผัสที่มากพอ จึงมีโอกาสเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Yang *et al.*, 2011) จากการทดลองพบว่าระยะเวลาสัมผัสของคอลัมน์ทรายสั้นกว่าระยะเวลาสัมผัสของคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจไม่มากพอที่จะทำให้เกิดกิจกรรมทางชีวภาพ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ทรายต่ำกว่าคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างด้วย Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า เมื่อวัดค่าที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสม

สารส้ม ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังตารางที่ 4.5

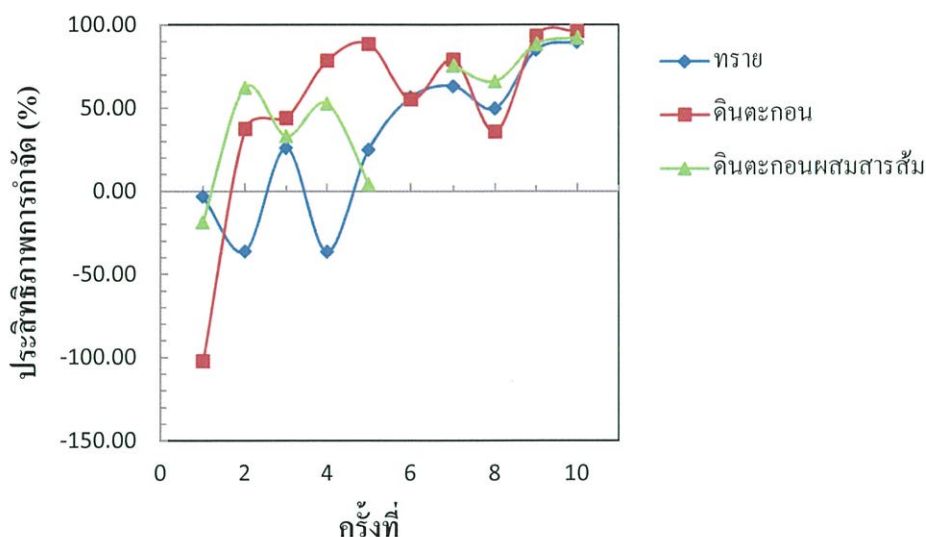
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

คอลัมน์	ประสิทธิภาพการกำจัด	
	(%เฉลี่ย, SD)	
ทราย	32.09 ± 45.62	(N = 10)
ดินตะกอน	50.65 ± 58.42	(N = 10)
ดินตะกอนผสมสารส้ม	50.85 ± 37.81	(N = 9)

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในคอลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance

คอลัมน์	N	Mean Rank	Chi-Square	df	Asymp.Sig
ทราย	10	12.10			
ดินตะกอน	10	17.30	1.945	2	.378
ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	15.67			
รวม	29				

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย

จากการศึกษาของแข็งแขวนลอยด้วยวิธีอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสในน้ำที่ผ่านการกำจัดด้วยคอลัมน์ทั้งสามประเภท ได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม พบว่าคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมากกว่าคอลัมน์ทราย คือ 73.42%, 72.23% และ 63.97% ตามลำดับ โดยคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดไม่ต่างกันมากนัก ของแข็งแขวนลอยจะถูกกำจัดผ่านการกรอง (Zhao *et al.*, 2008) สังเกตได้จากการเกิดขึ้นของอนุภาคดินบางส่วนบนพื้นผิวของวัสดุในคอลัมน์ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างด้วย Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า เมื่อวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

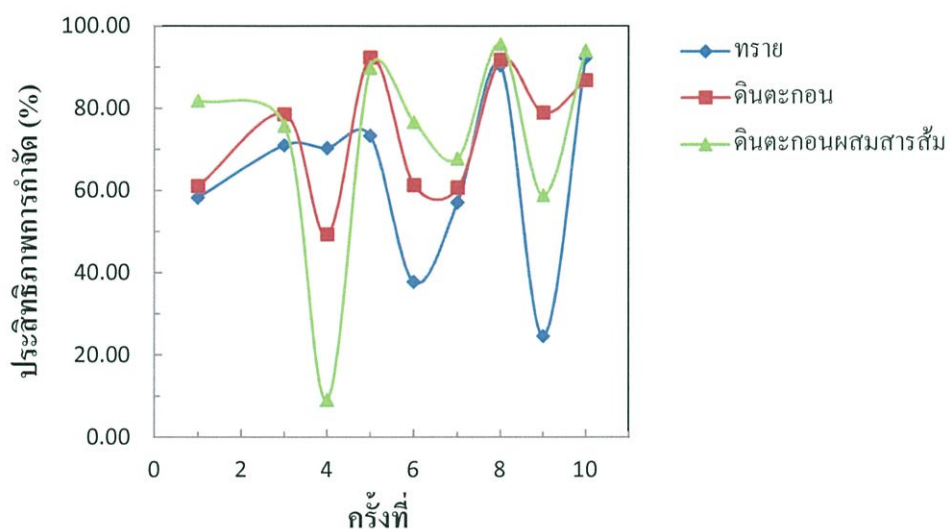
คอลัมน์	ประสิทธิภาพการกำจัด	
	(%เฉลี่ย, SD)	
ทราย	63.97 ± 22.36	(N = 9)
ดินตะกอน	73.42 ± 15.71	(N = 9)
ดินตะกอนผสมสารส้ม	72.23 ± 26.56	(N = 9)

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในคอลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis

One-way analysis of Variance

คอลัมน์	N	Mean Rank	Chi-Square	df	Asymp.Sig
ทราย	9	11.13			
ดินตะกอน	9	14.78	1.612	2	.447
ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	15.89			
รวม	27				

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียชุมชนด้วยดินตะกอนที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปามาบรรจุเป็นคอลลัมน์ เปรียบเทียบกับทรายและดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. คอลลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่าคอลลัมน์ทราย โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.01%, 99.09% และ 98.31% ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยหลักสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของคอลลัมน์ทั้งสามไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) นอกจากนี้ เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นด้วย

2. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลลัมน์ดินตะกอนและคอลลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้มมีค่ามากกว่าคอลลัมน์ทราย คือ 50.65%, 50.85% และ 32.09% ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยหลักสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลลัมน์ทั้งสามไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยซีโอดีจะถูกกำจัดเบื้องต้นผ่านการกรองและผ่านทางกายยอลสลวยทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในคอลลัมน์

3. คอลลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมากกว่าคอลลัมน์ทราย คือ 73.42%, 72.23% และ 63.97% ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยหลักสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของคอลลัมน์ทั้งสามไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มระยะเวลาการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดให้นานกว่านี้ เพื่อให้เห็นผลความแตกต่างของแต่ละคอลลัมน์อย่างชัดเจน
2. ศึกษาการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น สารหนู ปปรอท แคดเมียม เป็นต้น
3. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียของดินตะกอนโดยระบบต่อเนื่องและระบบต่อเนื่องกันแบบอนุกรม (multi-stage)

4. ศึกษาการนำดินตะกอนที่ผ่านน้ำเสียแล้วไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำ (wet land) เพื่อเป็นการกำจัด โลหะหนักที่ตกค้างอยู่ภายในดิน และเพื่อเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์และธาตุอาหารแก่ดินที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืช

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดินและการวิเคราะห์เพื่อ
ตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 1 . กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ดิน น้ำ และพืชด้านสิ่งแวดล้อม.
กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- การประปานครหลวง. 2555. “กรรมวิธีผลิตน้ำประปา”. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/main.php?filename=treat_water (วันที่ค้นข้อมูล 3 พฤษภาคม 2556)
- การประปานครหลวง. 2555. “โรงผลิตน้ำบางเขน”. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/download/business/bkplant_th.pdf (วันที่ค้นข้อมูล: 3 พฤษภาคม 2556)
- เกษม พฤษะวัน. 2548. “เพิ่มคุณค่าให้กับตะกอนดิน...ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา”. [Online].
Available: <http://eco-town.dpim.go.th/article/detail.php?id=700> (วันที่ค้นข้อมูล 20
พฤษภาคม 2556)
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2553. “กรรมวิธีผลิตน้ำประปา”. [Online].
Available: <http://www.pe.eng.ku.ac.th/files/semimar/2010/Group6/howto.html> (วันที่ค้น
ข้อมูล 3 พฤษภาคม 2556)
- ชลทิศ แก้วลี. 2547. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชนิดา สีหาโมก. 2553. ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีโดยใช้กาก
ตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหา
บัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์สกุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร: โครงการตำราเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา
พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,
1-21.
- ชัยวัฒน์ วรพิบูลพงศ์. 2547. “โครงการแนวคิด การทำ วิจัยการใช้ตะกอนจากการผลิตน้ำประปาให้
เป็นประโยชน์ในทางเศรษฐกิจ”. [Online]. Available: [http://www.mwa.co.th/ewt_dl_](http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=469)
[link.php?nid=469](http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=469) (วันที่ค้นข้อมูล 12 มีนาคม 2556)
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ Adsorption process. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 113-122.

- มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์. “มลพิษสิ่งแวดล้อม”. [Online]. Available: <http://reg.ksu.ac.th/teacher/anurak/Lesson3.html> (วันที่ค้นข้อมูล 5 พฤษภาคม 2556)
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2537. **วิศวกรรมประปา เล่ม1**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุนีรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2549. การดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโดยสหร่าย. งานวิจัยภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
- สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย. 2547. **เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง: ตะกั่ว LEAD**. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ.
- อานูช แก้ววงศ์. 2548. ประโยชน์จากตะกอนน้ำเสียชุมชน. **วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ**, 2(2), 34-36.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22nd Edition. USA: American Public Health Association.
- Bonzongo J. and Hovsepyan A. 2009. drinking water treatment residuals (Al-WTRs) as sorbent for mercury: Implication for soil remediation. **Journal of Hazardous Materials**.164: 73-80.
- Chu W. 1999. Lead Metal Removal by Recycle Alum Sludge. **Water Research**. 33(13): 3019-3025.
- Dauber, T.E. and Danner, R.P. 1989. **Physical and Thermodynamic Properties of Pure Chemicals Data Compilation**. Washington, D.C., USA: Taylor and Francis.
- G.Tchobanoglous, F.L. Burton, H.D. Stensel. 2003. **Fundamentals of chemical coagulation Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. USA: McGraw-Hill. Inc, 478-493.
- IPCS. 1995. **Inorganic Lead. Environmental Health Critical 165. International Programme on Chemical Safety**. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Koppers, H.M.M. 1989. **Sludge Disposal**. Nieuwegein, Holland: KIWA – Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen.
- Magdi, S.H. and Iskandar, K. 1999. **Fate and transport of heavy metals in the vadose zone**. Boca Raton: Lewis, 189-191.
- Merck. 1997. **The Merck Index. An Encyclopedia of Chemical, Drugs, and Biological**. Twelfth edition. Budavari S. Editor. Merck Research Laboratories, Whitehouse Station. New Jersey, USA.

- Pagliuca, A, Mufti, G.J., Baldwin, D., Lestas, A.N., Wallis R M, Bellingham A J, 1990. Lead poisoning: clinical, biochemical, and hematological aspects of a recent outbreak. **Journal of Clinical Pathology**, 43(4): 277-281.
- Pickering, Q.H. and Henderson, C. 1966. Acute toxicity of some important petrochemicals to fish. **J Water Pollut Control Fed** 38, 1419-1429.
- Samuel, D. and Osman, M. 1986. **Adsorption process for water treatment**. USA: Butterworth., 217-225.
- Schuthess, C.P. and Huang, C.P. 1990. Adsorption of heavy metals by silicon and aluminium oxide surfaces on clay minerals. **Soil. Sci. Soc. Am. J.** 54: 267-273.
- Sisisha, D, Mukkanti ,K. and Gandhi, N. 2012. Adsorption Studies on Alum Sludge. **Pelagia Research Library**. 3(5):3362-3366.
- Wild Alan. 1993. **Soils and the Environment: An Introduction**. New York: Cambridge University Press, 201-202.
- Yu, X., et al. 2012. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by carboxylated cellulose nanocrystals. **Journal of Environmental Sciences**, 24: 1-26.
- Xu, G.R., Yan, Z.C., Wang, Y.C. and Wang, N. 2009. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. **Hazard Mater.** 161: 663-9.
- Yang, Y., Zhao, Y.Q., Wang, S.P., Guo, X.C., Ren, Y.X., Wang, L., and Wang, X.C. 2011. A promising approach of reject water treatment using a tidal flow constructed wetland system employing alum sludge as main substrate. **Water Science & Technology**, 63 (10): 2367-2373.
- Zazouli, M.A. and Yousefi, Z. 2008. Removal of Heavy Metals from Solid Wastes Leachates Coagulation-Flocculation Process. **Journal of Applied Sciences**. 8(11): 2142-2147.
- Zenz, C., Dickerson, O.B., and Horvath, E.P. 1994. **Occupational Medicine**. 3rd Edition. USA : Missouri.
- Zhou, Y.F. and Haynes, R. 2011. Removal of Pb(II), Cr(III) and Cr(VI) from Aqueous Solutions Using Alum-Derived Water Treatment Sludge. **Water, Air and Soil Pollution**, 215(1-4): 631-643.

- Zhao, Y.Q. and Yabg, Y. 2010. Extending the use of dewatered alum sludge as a P-trapping material in effluent purification: Study on two separate water treatment sludges. **J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.** 45(10): 1234-9.
- Zhao, Y.Q., Babatunde, A.O., Razal, M., and Harty F. 2008. "Use of dewatered alum sludge as a substrate in reed bed treatment systems for wastewater treatment". **J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.** 43(1): 105-110.
- Zhao, Y.Q., Hu, Y.S., Zhao, X.H., and Kumar, J.L.G. 2012. Comprehensive analysis of step-feeding strategy to enhance biological nitrogen removal in alum sludge-based tidal flow constructed wetlands. **Bioresource Technology.** 111: 27-35.

ภาคผนวก ก
วิธีการดำเนินงาน

ก-1 วิธีการเตรียมน้ำเสีย

นำน้ำเสียปริมาตร 60 L นำมาเติมสารละลายตะกั่วไนเตรต(Spiked solution) เข้มข้น 0.1596 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ปริมาตร 1,800 mL สารละลายซูโครส(น้ำตาลทราย)เข้มข้น 3.1093 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ปริมาตร 500 mL และสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.4371 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ปริมาตร 1,500mL จะได้ตัวอย่างน้ำเสียที่มีปริมาณตะกั่ว 30 mg/L ฟอสเฟต 25 mg/L และมีค่า ซีไอดี 300 mg/L สำหรับใช้ในการทดลอง

ก-2 วิธีการวิเคราะห์น้ำเสีย

ก-2.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง pH meter
2. บีกเกอร์พลาสติก ขนาด 50 mL หรือ ขนาด 100 mL
3. กระบอกตักน้ำ

2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน pH 7.0 (Standard buffer Solution)
2. สารละลายมาตรฐาน pH 4.0 (Standard buffer Solution)

3. วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องวัดพีเอช เพื่ออุ่นเครื่องก่อนวัดประมาณ 5-10 นาที
2. Calibrate ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่คาดว่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่จะวัด แต่เครื่องวัดพีเอชบางยี่ห้อ เช่น WTW จะกำหนดสารละลายบัฟเฟอร์ไว้ คือ พีเอช 4.0 และ 7.0 ในขณะที่เครื่องวัดพีเอชบางยี่ห้อเช่น DENVER สามารถเลือกสารละลายบัฟเฟอร์ที่ต้องการ ทำได้โดยเทสารละลายลงบีกเกอร์ จุ่มหัววัดลงไปในสารละลาย แล้วทำตามขั้นตอนที่แนะนำสำหรับเครื่องวัดพีเอชแต่ละยี่ห้อ ขณะ Calibrate ควรแกว่งหัววัดเบาๆ
3. ล้างหัววัดด้วยน้ำกลั่น และซับให้แห้งก่อนวัดพีเอชทุกครั้ง
4. เทตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดลงบีกเกอร์ แล้วทำการวัด โดยแกว่งหัววัดเบาๆ
5. เมื่อค่าพีเอชหยุดนิ่งประมาณ 10 วินาที อ่านค่าที่วัดได้
6. ทำความสะอาดหัววัดแล้วเก็บให้เรียบร้อย

ก-2.2 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Electrical Conductivity Bridge
2. Specific Conductance Cell

2. สารเคมี

Standard Potassium Chloride Solution 0.01 N ละลาย 0.7456 g ของ Anhydrous Potassium Chloride (อบที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นใน Desiccator) ด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น ปรับสารละลายให้อยู่ที่อุณหภูมิ 25 °C จะวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ 1.4118 dS m⁻¹

3. วิธีการทดลอง

1. ต่อ Specific Conductance Cell กับ Electrical Conductivity Bridge เพื่อให้ครบวงจร อุณหภูมิประมาณ 30 นาที ตรวจสอบ cell ด้วยน้ำยา Standard Potassium Chloride Solution 0.01 N ที่ 25±0.1 °C จะได้ค่าเท่ากับ 1.4118 dS m⁻¹ แสดงว่าเครื่องถูกต้องและใช้งานได้
2. วัดค่า EC จากตัวอย่างน้ำ โดยการจุ่ม electrode ลงในน้ำตัวอย่าง

ก-2.3 การวิเคราะห์ห่าซึโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titration Method)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยโบโรซิลิเกต (Borosilicate culture tube) ขนาด 16 × 100 mm ที่มีฝากลีสวชนิดทีเอฟที (Tetrafluoroethylene; TFE)
2. บล็อกฮีตเตอร์ (Block heater) หรือตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 150 ± 2 °C การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 °C จะไม่ทำให้ฝากลัดแก้วถูกทำให้เสียหาย

2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution 0.1 N)
 - นำ K₂Cr₂O₇ อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก K₂Cr₂O₇ มา 4.913 g ละลายในน้ำกลั่น 500 mL เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 mL และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 g ที่ทำให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 mL
2. สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต
 - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO₄) 22 g ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 L) ที่ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย
3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

- ละลาย (1, 10-phenanthroline monohydrate $C_{12}H_{18}N_2H_2O$) 1.485 g และไอรีออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 g ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 mL

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 N

- ต้องนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งก่อนใช้ โดยเติมสารเคมีทุกชนิดตามตาราง ก-2 ลงในหลอดแก้วที่ต้องการโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็น เติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย FAS จุดยุติจะเปลี่ยนจากเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

ตาราง ก-1 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดหลอด ย่อยสลาย	ปริมาตรน้ำ (mL)	ปริมาตรสารละลาย โพแทสเซียมไดโครเมต สำหรับย่อยสลาย (mL)	สารละลาย กรดซัลฟูริก (mL)	ปริมาตรรวม (mL)
หลอดแก้ว				
16 x 100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0
หลอดมาตรฐาน 10 mL	2.5	1.5	3.5	7.5

3. วิธีการทดลอง

1. ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟูริก 20 % ก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน

2. หลอดแก้วที่ใช้หาซีโอดีหลายขนาด การเลือกใช้ขึ้นกับค่าซีโอดีที่มีในตัวอย่างน้ำในกรณีค่าซีโอดีสูง ใช้ตัวอย่างน้ำในปริมาณน้อยจึงใช้หลอดแก้วขนาดเล็ก (16 x 100 mm) เพราะใช้สารเคมีน้อยที่สุด ดังนั้นตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำมากๆ มักจะมีค่าผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างน้ำน้อยเกินไป

3. เมื่อเลือกขนาดหลอดแก้วแล้วให้ใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 2.5 mL โดยเติมตัวอย่างน้ำลงหลอดแก้วแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต โดยปิเปต 1.5 mL สำหรับย่อยสลาย ค่อยเติมสารละลายกรดซัลฟูริก 3.5 mL ให้เกิดชั้นกรดอยู่ในแก้ว ปิดฝาให้แน่นพอดี แล้วกลับไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี

4. นำหลอดแก้วใส่ลงในฮีทติ้งบล็อกหรือตู้อบที่อบ $150^{\circ}C$ แล้วอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำหลอดแก้ววางลงในขวด

ข้อควรระวัง: ควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนขณะกลับหลอดแก้วไปมา และควรผสมสารละลายให้เข้ากันก่อนให้ความร้อนเพื่อป้องกันการระเบิด

5. เปิดฝาหลอดแก้วใส่แท่งแม่เหล็กกวนขนาดเล็กที่หุ้ม TFE แล้วเติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด คนอย่างเร็วบนเครื่องกวนแม่เหล็กแล้วไทเทรตกับ FAS 0.05 N จนกระทั่งเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลแดง หรือเทสารละลายจากหลอดแก้วลงขวดรูปกรวยก็ได้เพื่อความสะดวกในการไทเทรต แต่ต้องใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด

6. ทำแบลนด์ด้วยทุกครั้งโดยใช้สารเคมีและน้ำกลั่นปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำ

4. การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (mgO}_2\text{/L)} = \frac{(B - S) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}} \quad (\text{ก. 1})$$

เมื่อ B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลนด์ (mL)

S = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (mL)

N = ความเข้มข้นของ FAS (N)

ก-2.4 การวิเคราะห์หาคะกำในน้ำ (AWWA, 2012)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Hot plate
2. Conical flask, 125 mL
3. Volumetric flask, 100-mL
4. กระจกนาฬิกา
5. Safety shield
6. Safety goggles
7. กระดาษกรองยี่ห้อ WHATMAN NO. 42
8. กระดาษกรองละเอียดขนาด 0.45 ไมครอน
9. ปิเปตขนาด 10 mL
10. ไมโครปิเปต
11. Atomic absorption spectrophotometer (AAS)

2. สารเคมี

1. Nitric acid (HNO₃), conc., or trace-metals grade or ultrapure
2. Perchloric acid, HClO₄
3. Ammonium acetate solution

- ละลาย $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ 500 g ในน้ำกลั่น 600 mL

4. สารละลายมาตรฐาน Pb เข้มข้น 1,000 ppm

3. วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำโดยวิธี Nitric Acid-Perchloric Acid Digestion (AWWA, 2012)

1. นำน้ำตัวอย่างจำนวน 100 mL ใส่ conical flask(หรือบีกเกอร์) นำไปตั้งไว้ในตู้ดูดควัน เติม กรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3) 3 mL เติมเศษกระเบื้อง ปิดด้วยกระจกนาฬิกา

2. ยกขึ้นตั้งบน hot plate ทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิประมาณ 95°C จนกระทั่งเหลือตัวอย่างประมาณ 15-20 mL ยกออกจาก hot plate เติม HNO_3 และ HClO_4 อย่างละ 10 mL (ระหว่างเติมให้ใช้น้ำหล่อเย็นด้วย)

3. ยกขึ้นตั้งบน hot plate อีกครั้งจนกระทั่งปรากฏควันสีขาวของ HClO_4 ถ้าสารละลายไม่ใส ให้ต้มต่อไปจนกระทั่งใส ถ้าจำเป็นให้เติม conc. HNO_3 10 mL เพื่อให้การย่อยสมบูรณ์

4. ยกออกจาก hot plate ทำให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีปริมาตร 50 mL นำไปต้มเพื่อกำจัดคลอรีนและสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน นำมากรองด้วยกระดาษกรองยี่ห้อ WHATMAN NO.42

5. นำสารละลายที่กรองได้แบ่งออกเป็นสองส่วน ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 mL ทำให้เย็น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร ผสมให้เข้ากัน นำสารละลายที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์หาตะกั่วต่อไป

หมายเหตุ: การให้ความร้อนแก่สารละลายผสมของ HClO_4 และสารอินทรีย์อาจทำให้เกิดการระเบิดรุนแรง หลีกเลี่ยงอันตรายเหล่านี้โดยทำตามข้อควรระวังดังนี้

- 1) ไม่เติม HClO_4 เข้าไปในสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ขณะร้อน
- 2) จะต้องเติม HNO_3 ลงในตัวอย่างที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ก่อนเติม HClO_4 เสมอ
- 3) อย่าปล่อยให้ตัวอย่างแห้งขณะที่ทำการย่อยด้วย HClO_4

3.2 การวัดหาความเข้มข้นของตะกั่ว

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน stock standard solution Pb 10 ppm ปริมาตร 100 mL

- ทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ความเข้มข้น 1,000 ppm จำนวน 1.0 mL ลงใน volumetric flask ขนาด 100 mL ปรับปริมาตรสารละลายด้วย 1% HNO_3

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 และ 7.0 ppm เพื่อนำมาใช้ทำกราฟมาตรฐาน

- ทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 ppm จำนวน 0.25, 1.25, 2.50, 7.50, 12.50 และ 17.50 mL ลงใน volumetric flask ขนาด 25 mL ปรับปริมาตร

สารละลายด้วย 1% HNO_3 จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 และ 7.0 ppm ตามลำดับ

3. นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมได้ไปวัดค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก โดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) รุ่น AAS-200 ของบริษัท PerkinElmer ที่ความยาวคลื่น 217.0 nm

4. วัดตัวอย่างสารละลายดินและแบลงค์ นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของตะกั่ว

4. การคำนวณ

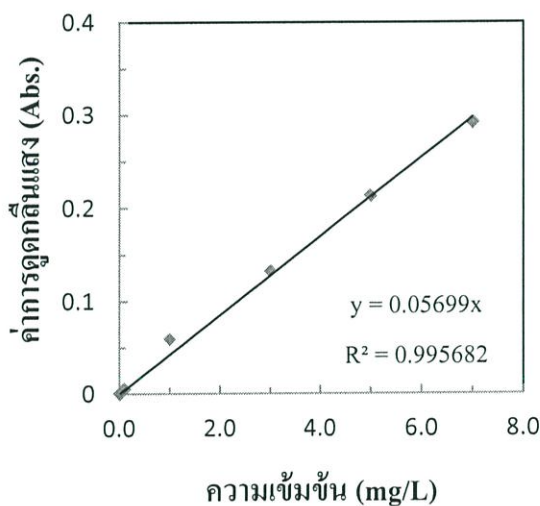
$$\text{ความเข้มข้นของตะกั่ว (mg/L)} = A \times \frac{B}{C} \quad (\text{ก. 2})$$

เมื่อ A = ความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้ในสารละลายที่ถูกย่อย (mg/L)

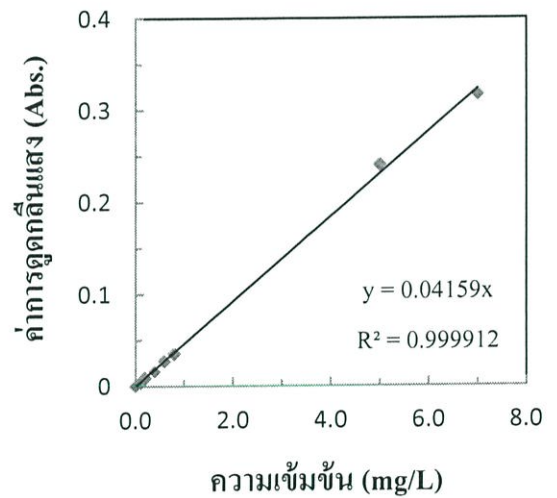
B = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลาย (mL)

C = ปริมาตรของตัวอย่าง (mL)

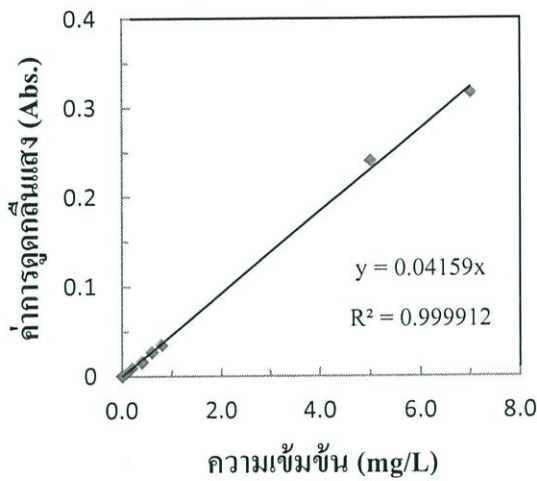
5. กราฟมาตรฐานตะกั่ว



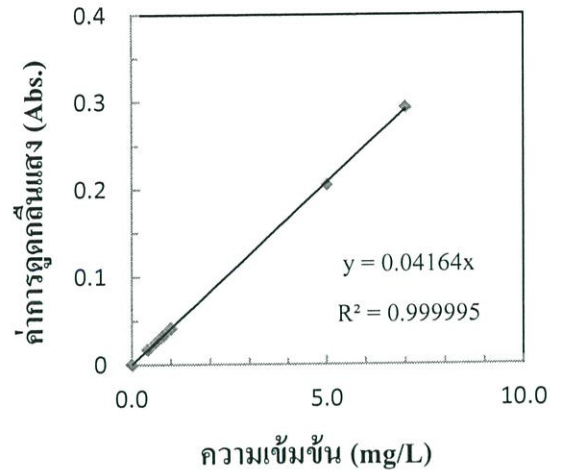
สำหรับผลการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3



สำหรับผลการทดลองวันที่ 4, 5, 6 และ 7



สำหรับผลการทดลองวันที่ 8 และ 9



สำหรับผลการทดลองวันที่ 10

รูป ก-1 กราฟมาตรฐานตะกั่ว ที่ความยาวคลื่น 217.00 นาโนเมตร

ก-2.5 การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (AWWA, 2012)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระจกทรงไข่แก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 cm
2. อุปกรณ์ชุดกรอง
3. เครื่องดูดอากาศ
4. เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 103-105 °C
5. โถทำแห้ง พร้อมสารดูดความชื้น
6. เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
7. กระจกอะลูมิเนียม เพื่อทำเป็นภาชนะสำหรับใส่กระจกกรอง
8. กระจกตวง
9. Tung
10. คีมหนีบ (Forceps)

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมกระจกกรอง

1. นำกระจกกรองไปใส่ไว้ในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทำรหัสไว้ ต่อชุดกรอง นำกระจกกรองไปล้างด้วยน้ำกลั่น 20 mL
2. อบถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมกระจกกรองที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน โถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมกระจกกรอง

3. เก็บตัวอย่างอูมิเนียมพร้อมกระดาศกรองไว้ในโถทำแห้งจนกว่าจะนำมาใช้

2.2 การวิเคราะห์

1. เลือกตัวอย่างอย่างน้อย 10% ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด สำหรับการวิเคราะห์ซ้ำ

2. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำสำหรับนำไปกรองที่จะให้ค่าของแข็งแขวนลอยโดยประมาณ 2.5-200 mg กรณีที่เก็บตัวอย่างแช่เย็นไว้ ให้ทำให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องก่อน

3. ใช้คีมหนีบ คีบกระดาศกรองที่ทราบน้ำหนักในโถทำแห้ง มาวางลงบนกรวยในชุดกรอง ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศโดยให้ด้านขรุขระของกระดาศกรองอยู่ด้านบน ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาศกรองให้เปียก และให้ถูกดูดติดแน่นกับกรวย

4. เขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันดี แล้วเทตัวอย่างใส่กระบอกตวง(50-100 mL) หรือปิเปต ครั้งเดียวให้ได้ปริมาตรใกล้เคียงกับที่ต้องการ แล้วจดบันทึกปริมาตรที่เทได้ เทตัวอย่างใส่ชุดกรอง เปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้น้ำกลั่น (10 mL) ฉีดล้างของแข็งที่อาจติดอยู่ข้างกระบอกตวง และชุดกรองจนหมดรองจนกว่ากระดาศกรองแห้ง กรองต่ออีก 3 นาที

5. ปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้คีมหนีบคีบกระดาศกรองใส่ด้วยอะลูมิเนียมอันเดิมนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักด้วยอูมิเนียมพร้อมกระดาศกรองใหม่

6. นำไปอบซ้ำอีกจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ คือ น้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งแตกต่างกันไม่มากกว่า 0.0005 g หรือ มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักครั้งแรก

รายละเอียดการประกันคุณภาพ (quality assurance criteria)

- QA Limit สำหรับการวิเคราะห์ซ้ำเท่ากับ 10%
- ปริมาณตะกอนบนกระดาศกรองหลังจากนำไปอบแห้งแล้วควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5-200 mg

3. การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (SS), mg/l} = \frac{(B - A)}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้, ml}} \times 1,000 \quad (\text{ก. 3})$$

A = น้ำหนักด้วยอูมิเนียมพร้อมกระดาศกรอง, mg

B = น้ำหนัก (ที่ชั่งได้ค่าน้อยที่สุด) ด้วยอูมิเนียมพร้อมกระดาศกรองและตัวอย่าง, mg

ภาคผนวก ข
ตารางผลการทดลอง

ตาราง ข-1 คุณสมบัติเบื้องต้นของคอลัมน์

พารามิเตอร์	คอลัมน์		
	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	15.24 cm	15.24 cm	15.24 cm
ความสูงของคอลัมน์	75 cm	75 cm	75 cm
ความสูงของชั้นตัวกลาง	35 cm	35 cm	35 cm
ขนาดอนุภาคของชั้นตัวกลาง	0.05-2.00 mm	< 0.5 cm	< 0.5 cm
ระยะเวลาพักเก็บ (HRT)	20 hrs	36.40 hrs	37.88 hrs
อัตราการซึมผ่านของน้ำ	0.8028×10^{-3} m/s	0.3671×10^{-3} m/s	0.3128×10^{-3} m/s

ตาราง ข-2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากถุระบายน้ำทิ้ง

พารามิเตอร์	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
ค่าพีเอช	6.82	7.10	6.78	7.78	6.85
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	1.83	0.87	0.37	0.32	1.20
ซีโอดี (mgO ₂ /L)	78.72	75.00	119.75	186.59	105.41
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	6.00	16.25	15.75	16.25	26.18
ปริมาณตะกั่ว (mg/L)	0.070	< 0.070	0.068	0.341	0.078
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) (mg/L)	-	1.04	0.91	1.37	1.76
ปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP) (mg/L)	-	0.19	0.23	0.71	1.03
ปริมาณซิลิเกต (mg/L)	-	86.60	33.75	94.30	90.08
ปริมาณคลอไรด์ (mg/L)	-	1.81	0.63	1.96	1.21
ปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจน (mg/L)	-	0.05	1.31	1.50	0.30
ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน (mg/L)	-	0.53	-0.20	2.83	1.04
ปริมาณแอมโมเนีย (mg/L)	-	4.93	0.62	1.51	6.38

ตาราง ข-3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วโดยใช้การทดลองแบบแบบตซ์

จำนวนซ้ำ	ปริมาณตะกั่ว (mg/L)			
	ตัวควบคุม	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสม สารส้ม
1	16.540	13.147	2.293	2.867
	16.753	13.260	1.934	2.876
2	16.770	13.603	2.431	2.854
	16.853	13.637	2.658	2.886
3	16.910	13.497	2.305	2.509
	16.930	13.393	1.825	2.447
เฉลี่ย, SD	16.793 ± 0.14	13.423 ± 0.19	2.241 ± 0.31	2.740 ± 0.20
ประสิทธิภาพการ กำจัด (%)		20.07 ± 0.88	86.65 ± 1.86	83.68 ± 1.31
<i>N</i>	6	6	6	6

ตาราง ข-4 ค่าพีเอชของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ครั้งที่	ค่าพีเอช ก่อนผ่านคอลัมน์	ค่าพีเอชหลังผ่านคอลัมน์									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	4.75	7.02	7.03	6.29	6.31	6.46	6.49	6.36	6.34	6.32	6.39
2	7.59	7.45	7.51	7.40	7.39	7.32	7.29	7.04	7.06	6.85	6.87
3	7.18	7.22	7.24	6.95	6.95	7.23	7.23	7.46	7.48	7.41	7.42
4	7.35	7.36	7.32	7.38	7.46	7.22	7.26	7.69	7.63	7.43	7.48
5	6.25	7.30	7.39	7.38	7.31	7.59	7.64	7.20	7.20	7.52	7.54
6	6.57	6.98	6.94	6.89	6.88	7.36	7.37	6.89	7.00	7.29	7.30
7	7.02	7.35	7.19	7.47	7.52	7.84	8.01	7.51	7.54	7.87	7.84
8	7.32	7.46	7.47	7.13	7.09	7.54	7.63	7.66	7.66	7.57	7.57
9	6.88	6.97	7.00	7.07	7.10	7.89	7.91	7.96	7.96	7.95	7.92
10	3.81	7.10	7.12	7.14	7.15	7.56	7.56	8.00	7.99	7.81	7.82
เฉลี่ย, SD	6.47 ± 1.24	7.22 ± 0.19		7.27 ± 0.40				7.40 ± 0.48			
N	10	20		40				40			

ตาราง ข-5 ค่าการนำไฟฟ้าของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ครั้งที่	ค่าการนำไฟฟ้า ก่อนผ่านคอลัมน์ (ms/cm)	ค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านคอลัมน์ (ms/cm)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	0.85	0.97	0.97	2.65	2.51	2.60	2.57	2.97	3.08	2.90	2.88
2	1.25	1.33	1.65	2.76	2.69	2.39	2.37	2.78	2.97	2.45	2.28
3	1.41	2.51	2.39	3.84	3.95	4.29	4.35	3.23	3.04	3.31	3.43
4	0.90	2.70	2.77	3.71	3.77	3.51	3.52	2.99	3.02	3.82	3.69
5	0.41	0.98	0.98	1.75	1.84	2.11	2.11	2.02	2.02	2.22	2.24
6	0.48	0.45	0.45	1.24	1.21	0.87	1.19	1.35	1.33	1.28	1.20
7	0.03	1.70	1.72	2.82	2.82	2.60	2.60	2.73	2.73	2.59	2.59
8	1.30	1.35	1.36	1.45	1.47	1.42	1.43	1.42	1.42	1.44	1.43
9	1.90	1.16	1.59	1.53	1.56	1.44	1.42	1.53	1.54	1.47	1.47
10	2.14	1.93	1.93	1.74	1.77	1.94	1.93	1.98	1.97	2.03	2.06
เฉลี่ย, SD	1.07 ± 0.66	1.54 ± 0.68		2.34 ± 0.94				2.32 ± 0.75			
N	10	20		40				40			

ตาราง ข-6 ปริมาณตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ครั้งที่	ปริมาณตะกั่ว ก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณตะกั่วหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	21.000	0.225	0.235	0.233	0.209	0.280	0.296	0.298	0.239	0.219	0.267
2	7.080	0.137	0.127	0.104	0.099	0.173	0.154	0.158	0.181	0.158	0.161
3	19.667	0.112	0.112	0.125	0.089	0.081	0.098	0.081	0.093	0.102	0.102
4	15.307	0.391	0.422	0.026	0.183	0.155	0.154	0.138	0.136	0.145	0.142
5	17.745	0.035	0.029	0.041	0.033	0.048	0.044	0.008	0.010	0.014	0.021
6	11.118	0.696	0.551	0.132	0.121	0.098	0.107	0.028	0.035	0.032	0.044
7	6.540	0.036	0.031	0.014	0.004	0.014	0.015	0.009	0.013	0.006	0.005
8	3.933	0.128	0.113	0.132	0.125	0.100	0.115	0.096	0.091	0.119	0.120
9	23.008	0.273	0.169	0.114	0.112	0.099	0.094	0.117	0.111	0.111	0.101
10	32.867	0.117	0.143	0.241	0.244	0.125	0.127	0.188	0.185	0.106	0.102
เฉลี่ย, SD	15.826 ± 8.91	0.204 ± 0.18		0.119 ± 0.07				0.107 ± 0.08			
N	10	20		40				40			

ตาราง ข-7 ค่าซีไอดี คอแล็มน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ครั้งที่	ปริมาณซีไอดี ก่อนผ่านคอแล็มน์ (mgO ₂ /L)	ปริมาณซีไอดีหลังผ่านคอแล็มน์ (mgO ₂ /L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	330.27	343.88	337.08	708.20	660.53	626.48	674.15	-	-	398.36	384.74
2	94.32	120.52	136.24	62.88	52.40	52.40	68.12	26.20	20.96	52.40	41.92
3	379.01	306.82	252.67	162.43	270.72	252.67	162.43	234.62	288.77	216.58	270.72
4	139.71	192.33	188.70	32.66	32.66	25.40	29.03	68.95	58.06	68.95	67.13
5	343.53	240.04	274.33	50.53	52.34	19.85	34.29	375.40	386.23	276.13	-
6	67.61	30.25	28.47	23.13	26.69	-	35.58	-	-	-	-
7	347.02	133.73	120.19	60.94	74.48	88.03	67.71	76.18	74.48	93.10	93.10
8	87.80	49.93	37.88	60.26	55.09	61.98	48.20	30.99	24.10	34.43	29.27
9	428.66	69.70	57.02	28.51	25.34	31.68	26.93	61.78	69.70	31.68	31.68
10	258.53	27.65	24.19	-	-	10.37	8.64	12.10	17.28	22.46	25.92
เฉลี่ย, SD	247.64 ± 130.06	148.58 ± 111.06		128.75 ± 199.04				120.13 ± 127.85			
N	10	20		37				33			

หมายเหตุ : - คือ ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้

ตาราง ข-8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ครั้งที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนผ่านคอลลัมน์ (mg/L)	ปริมาณของแข็งแขวนลอยหลังผ่านคอลลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	72.00	32.00	28.00	30.00	34.00	26.00	22.00	20.00	20.00	-	6.00
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	146.88	40.00	45.00	30.00	28.75	37.50	30.00	26.25	35.00	33.75	47.50
4	88.75	32.50	20.00	27.50	12.50	60.00	80.00	81.25	86.25	85.00	70.00
5	77.50	28.75	12.50	11.25	8.75	2.50	1.25	13.75	-	1.25	2.50
6	143.75	96.25	82.50	62.50	57.50	51.25	-	8.75	10.00	68.75	46.25
7	78.75	26.25	41.25	55.00	30.00	5.00	33.75	18.75	15.00	-	33.75
8	137.50	12.50	13.75	11.25	13.75	11.25	8.75	3.75	5.00	7.50	7.50
9	50.63	38.86	37.44	8.75	7.75	22.50	3.75	54.45	11.25	6.25	11.25
10	106.88	13.75	2.50	15.00	-	20.00	6.25	7.50	6.25	5.00	6.25
เฉลี่ย, SD	100.29 ± 33.12	33.54 ± 23.68		25.47 ± 19.91				26.11 ± 26.42			
N	10	18		34				33			

หมายเหตุ : - คือ ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้

ตาราง ข-9 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (%)			ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)			ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย (%)		
	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
1	98.91	98.79	98.78	-3.09	-102.06	-18.56	58.33	61.11	81.94
2	98.13	98.13	97.68	-36.11	37.50	62.50	-	-	-
3	99.43	99.50	99.52	26.19	44.05	33.33	71.06	78.51	75.74
4	97.35	99.15	99.08	-36.36	78.57	52.92	70.42	49.30	9.15
5	99.82	99.77	99.93	25.13	88.57	4.38	73.39	92.34	89.92
6	94.39	98.97	99.69	56.58	55.26	-	37.83	61.30	76.74
7	99.49	99.82	99.87	63.41	79.02	75.73	57.14	60.71	67.86
8	96.94	97.00	97.28	50.00	35.78	66.18	90.45	91.82	95.68
9	99.04	99.55	99.52	85.22	93.44	88.64	24.64	78.89	58.91
10	99.60	99.44	99.56	89.97	96.32	92.48	92.40	86.84	94.15
เฉลี่ย, SD	98.31 ± 1.69	99.01 ± 0.87	99.09 ± 0.92	32.09 ± 45.62	50.65 ± 58.42	50.85 ± 37.81	63.96 ± 22.36	73.42 ± 15.71	72.23 ± 26.56
N	10	10	10	10	10	9	9	9	9

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ค-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) มีข้อตกลงเบื้องต้น (assumption) ของการวิเคราะห์ดังนี้

1. ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะต้องมาจากการสุ่มและเป็นอิสระต่อกัน
2. ประชากรที่จะเปรียบเทียบต้องมีการแจกแจงปกติ
3. ประชากรทุกกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบจะต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน (homogeneity of variance)

และหากไม่ผ่านข้อตกลงเบื้องต้นของการใช้ One-way ANOVA ก็จะเปลี่ยนมาใช้สถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance ซึ่งเป็น nonparametric ในการเปรียบเทียบ

ค-1.1 ประชากรที่จะเปรียบเทียบต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

H_0 : ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีการแจกแจงปกติ

H_1 : ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีการแจกแจงไม่ปกติ

ตาราง ค-1 ทดสอบการแจกแจงปกติ

Test of Normality				
ประสิทธิภาพ การจัด	คอลัมน์	Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.
ประสิทธิภาพการ กำจัดตะกั่ว	ทราย	.830	10	.033
	ดินตะกอน	.840	10	.044
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.815	10	.022
ประสิทธิภาพการ กำจัดซีโอดี	ทราย	.923	10	.379
	ดินตะกอน	.722	10	.002
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.916	9	.359

*. This is a lower bound of the true significance.

ตาราง ค-1 (ต่อ) ทดสอบการแจกแจงปกติ

		Test of Normality		
ประสิทธิภาพ การกำจัด	คอลัมน์	Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว	ทราย	.942	9	.604
กำจัดของแข็ง	ดินตะกอน	.902	9	.263
แขวนลอย	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.803	9	.022

*. This is a lower bound of the true significance.

จากการทดสอบพบว่าค่า p-value ของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงไม่ปกติ

ค-1.2 ประชากรทุกกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบจะต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน (homogeneity of variance)

H_0 : ความแปรปรวนของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ความแปรปรวนของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

ตาราง ค-2 ทดสอบความแปรปรวน

Test of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว	2.365	2	27	.113
กำจัดซีโอดี	.183	2	26	.834
กำจัดของแข็งแขวนลอย	.272	2	24	.764

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า p-value ของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 แสดงว่า ความแปรปรวนประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

ดังนั้น จากข้อตกลงเบื้องต้นของการใช้สถิติ One-way ANOVA พบว่าไม่ผ่านข้อตกลงเบื้องต้น ทำให้ไม่สามารถใช้ One-way ANOVA ได้ จึงเลือกใช้สถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance และหากพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ จะมีการทดสอบว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน โดยจะใช้การทดสอบ Mann-Whitney Test

ก-1.3 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

H_0 : ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่า ค่า p-value = 0.374 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 แสดงว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ก-1.4 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

H_0 : ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่า ค่า p-value = 0.378 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 แสดงว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ก-1.5 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

H_0 : ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่า ค่า p-value = 0.447 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 แสดงว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตาราง ก-3 เปรียบเทียบความแตกต่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

Kruskal-Wallis Test

		Ranks		Test Statistics			
		คอลลัมน์	N	Mean Rank	Chi-Square	df	Asymp. Sig.
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว	ทราย		10	12.60	1.969	2	.374
	ดินตะกอน		10	15.80			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม		10	18.10			
	Total		30				
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี	ทราย		10	12.10	1.945	2	.378
	ดินตะกอน		10	17.30			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม		9	15.67			
	Total		29				
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย	ทราย		9	11.33	1.612	2	.447
	ดินตะกอน		9	14.78			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม		9	15.89			
	Total		27				