

การบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนจากน้ำเสีย  
ด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์

TREATMENT OF PHOSPHATE IONS AND IONS DISSOLUTION FROM  
WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE

นางสาวอังจิมา	ทวีกุล
นางสาวอาภากร	ฉัตรเทียนชัย
นางสาวอารียา	โมหมัดตาเฮต

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนจากน้ำเสีย  
ด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์

TREATMENT OF PHOSPHATE IONS AND IONS DISSOLUTION FROM  
WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE

นางสาวอัจฉิมา	ทวีกุล
นางสาวอาภากร	ฉัตรเทียนชัย
นางสาวอาริยา	โมหมัดตาเฮต

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**TREATMENT OF PHOSPHATE IONS AND IONS DISSOLUTION  
FROM WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE**

**MISS ACHEMA TAVEKUL**

**MISS APHAKON CHATTIANCHAI**

**MISS AREEYA MOMADTAHED**

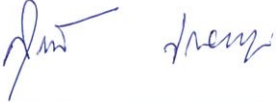
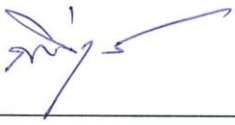

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

**โครงการพิเศษ**                      การบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนจากน้ำเสียด้วย  
    ตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์  
    TREATMENT OF PHOSPHATE IONS AND IONS DISSOLUTION  
    FROM WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE

**ชื่อนักศึกษา**                      นางสาวอัจฉิมา ทวีกุล                      รหัส 53051306  
    นางสาวอาภากร ฉัตรเทียนชัย                      รหัส 53051310  
    นางสาวอารียา โมหมัดตาเฮต                      รหัส 53051311

**ปริญญา**                                      วิทยาศาสตรบัณฑิต  
**สาขาวิชา**                                  เคมีสิ่งแวดล้อม  
**ปีการศึกษา**                                2556  
**อาจารย์ที่ปรึกษา**                      ผศ.พิสมัย                      ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน	
อ.กตินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษ	การบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนจากน้ำเสียด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์
	TREATMENT OF PHOSPHATE IONS AND IONS DISSOLUTION FROM WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE
ชื่อนักศึกษา	นางสาวอัจฉิมา ทวีกุล นางสาวอาภากร ฉัตรเทียนชัย นางสาวอารีญา โมหมัดคาเฮต
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยตะกอนสารส้มจากกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยใช้คอลัมน์ น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียชุมชนที่มีการเติมตะกั่วและฟอสเฟต ในปริมาณ 30 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมซูโครสเพื่อให้มีค่าซีโอดี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ออกแบบการทดลองในรูปคอลัมน์เปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ทำการปล่อยน้ำเสียดลคอลัมน์ทุกๆ สัปดาห์ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และออร์โธฟอสเฟต (OP) ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 93.06%, 98.45%, 98.69% และ 92.44%, 99.86%, 99.85% ตามลำดับ โดยถูกจับอยู่ที่อนุภาคของดิน และบางส่วนอาจอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนหรือห่อหุ้มเป็นผลึกคอลลอยด์ โดยเมื่อนำผลไปวิเคราะห์ด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่าวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน ได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตของคอลัมน์ทั้งสามมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) สำหรับผลการศึกษาการชะละลายของไอออนซัลเฟต คลอไรด์ รวมทั้งชนิดหรือรูปต่างๆ ของไนโตรเจนในน้ำ พบว่าคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมีปริมาณซัลเฟต และคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น และขณะที่น้ำหลังผ่านคอลัมน์ทั้งสาม รูปของไนโตรเจนที่พบมากที่สุดคือไนเตรต

คำสำคัญ: ตะกอนสารส้ม คอลัมน์ การบำบัดฟอสเฟต การชะละลายของไอออน

<b>Title</b>	TREATMENT OF PHOSPHATE IONS AND IONS DISSOLUTION FROM WASTEWATER USING COLUMN ALUM SLUDGE
<b>Students</b>	Miss Achema Tavekul Miss Aphakon Chattionchai Miss Areeya Momadtahed
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Pitsamai Chairatu-tai

### ABSTRACT

This project intends to study the adsorption of phosphate ions from wastewater using column containing recycled alum sludge. Synthetic wastewater used in this experiment was added with 30 mg/l lead and 25 mg/l phosphate, and sucrose in order to prepared wastewater with approximately 300 mg/l COD wastewater. The experiments were carried out in columns that filled with sand, alum sludge and spike alum sludge for comparison. The wastewater was fed into the column every weeks, for 71 days. The results showed that percentages removal of total phosphorus (TP) for sand, alum sludge and spike alum sludge were 93.06%, 98.45%, and 98.69% respectively, and for orthophosphate were 92.44%, 99.86%, and 99.85% respectively. Part of phosphate was adsorbed on soil particles, while the remaining formed complex compounds or colloids. The statistical analysis using Kruskal Wallis's one-way analysis of variance method showed that the percentages removal of orthophosphate (OP) by sand, recycled alum sludge, and spike alum sludge are significantly different ( $p < 0.05$ ). In addition, the study of the leaching of sulphate ions, chloride ions, and nitrogen showed that the concentrations of sulphate and chloride ions of wastewater after passed through alum sludge and spike alum sludge columns are increased. While leached nitrogen from these columns is nitrate.

**Keywords** : Alum sludge Column Phosphate treatment Ions dissolution

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์

ขอขอบพระคุณ อ.กถินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่การประสานครุหลวง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้ความรู้ และอนุเคราะห์ตะกอนสารส้มสำหรับโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมี เป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีตลอดมา

นางสาวอัจฉิมา ทวีกุล

นางสาวอาภากร นั้ตรเทียนชัย

นางสาวอารียา โมหมัดตาเฮต

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำย่อ และสัญลักษณ์	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ที่มาของตะกอนสารส้ม จากระบบผลิตน้ำประปา	3
2.2 สารส้ม และตะกอนสารส้ม	5
2.3 ลักษณะน้ำเสียชุมชน	6
2.4 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีเคมี	9
2.5 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพ	10
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.6.1 การนำตะกอนสารส้มมาบำบัดฟอสเฟต	13
2.6.2 การนำตะกอนสารส้มกลับมาใช้ประโยชน์	15
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>16</b>
3.1 อุปกรณ์ และสารเคมี	16
3.1.1 อุปกรณ์	16
3.1.2 สารเคมี	16

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ลักษณะตะกอน และน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2.1 การเตรียมดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	18
3.2.2 การเตรียมน้ำเสีย	18
3.2.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย	18
3.3 การเตรียมคอลัมน์	19
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟต และปริมาณไอออนชนิดต่าง ที่ถูกชะละลายออกมาจากคอลัมน์ตะกอนสารส้ม	20
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	20
3.5.1 สถิติพรรณนา	20
3.5.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว	20
3.5.3 กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05	20
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล</b>	<b>22</b>
4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟต	22
4.2 ผลการศึกษาการชะละลายของไอออนซัลเฟต และคลอไรด์	25
4.2.1 ผลการศึกษาปริมาณไอออนซัลเฟต	25
4.2.2 ผลการศึกษาปริมาณไอออนคลอไรด์	27
4.3 ผลการศึกษารูปหรือชนิดต่างๆของไนโตรเจนในน้ำเสีย และน้ำที่ผ่าน คอลัมน์	28
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	<b>30</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	30
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>31</b>
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ดินตะกอน และน้ำเสีย	34
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	50
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	61

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆในตะกอนสารส้ม	6
ตารางที่ 2.2 ลักษณะ และปริมาณของน้ำเสียชุมชน	8
ตารางที่ 2.3 ปริมาณของน้ำเสียชุมชนจากอาคารประเภทต่างๆ	9
ตารางที่ 2.4 สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย	10
ตารางที่ 2.5 มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	11
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย	19
ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอช และประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตของคอลลัมน์ทราย ดิน ตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	23
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัด TP และ OP ในคอลลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal- Wallis One-way analysis	25
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ $\text{SO}_4^{2-}$ ในน้ำเข้า คอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสม สารส้ม	26
ตารางที่ 4.4 ปริมาณการบำบัดซัลเฟตในคอลลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ One-way ANOVA	28
ตารางที่ 4.5 ปริมาณการบำบัดคลอไรด์ในคอลลัมน์ต่างๆด้วยสถิติ Kruskal Wallis One- way analysis of Variance	27

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา	4
รูปที่ 3.1 แสดงการบรรจุโคลัมน์	20
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน	21
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TP ในโคลัมน์ต่างๆ	24
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด OP ในโคลัมน์ต่างๆ	24
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณไอออนซัลเฟตในโคลัมน์ต่างๆ	26
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณไอออนคลอไรด์ในโคลัมน์ต่างๆ	27
รูปที่ 4.5 ปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ , $\text{NH}_4\text{-N}$ และ Org-N ในน้ำเข้า	28
รูปที่ 4.6 ปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ , $\text{NH}_4\text{-N}$ และ Org-N ในโคลัมน์ทราย	29
รูปที่ 4.7 ปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ , $\text{NH}_4\text{-N}$ และ Org-N ในโคลัมน์ดินตะกอน	29
รูปที่ 4.8 ปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ , $\text{NH}_4\text{-N}$ และ Org-N ในโคลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม	29

## คำย่อ และสัญลักษณ์

AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
cm	เซนติเมตร
<i>df</i>	องศาความเป็นอิสระ
dS m <sup>-1</sup>	เดซิซีเมนส์ต่อเมตร
g	กรัม
mg	มิลลิกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
ms/cm	มิลลิวินาทีต่อเซนติเมตร
N	จำนวนตัวอย่าง
nm	นาโนเมตร
OP	ออโรฟอสเฟต
S.D.	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
sig.	ระดับนัยสำคัญ
TKN	ไนโตรเจนทั้งหมด
TP	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
µg	ไมโครกรัม
%	เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ
°C	องศาเซลเซียส
*	ไม่มีผลการทดลอง
-	ต่ำกว่าขีดจำกัดที่เครื่องมือสามารถวัดได้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันปัญหาทางสิ่งแวดล้อมจัดเป็นปัญหาสำคัญซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการกระทำของมนุษย์ อันเนื่องมาจากความต้องการพื้นฐาน และความต้องการความสะดวกสบายในด้านต่างๆ ซึ่งผลของการบริโภคทำให้เกิดของเสียกระจายสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของขยะมูลฝอย น้ำเสีย อากาศเป็นพิษ ฯลฯ ส่งผลให้เกิดความเสื่อมโทรมต่อสภาพแวดล้อม สำหรับปัญหาสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดไม่แน่นอน (nonpoint source) ที่ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณมากขึ้นและควบคุมได้ยาก โดยเฉพาะจากพื้นที่เกษตรกรรม และชุมชน สารมลพิษกลุ่มหลักๆ ได้แก่ ยาฆ่าแมลง ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยอินทรีย์ ที่ใช้ในปริมาณมากขึ้นเพื่อเร่งผลผลิตให้ได้มากที่สุด ทำให้สารต่างๆ เหล่านี้ตกค้างในดิน และถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ก่อให้เกิดปัญหาสารมลพิษสะสมในเนื้อเยื่อของพืชน้ำ และสัตว์ รวมทั้งเพิ่มความเป็นพิษมากขึ้นตามลำดับขั้นของการบริโภค นอกจากนี้จะส่งผลด้านสุขภาพแล้วยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ (ecosystem disruption) เช่น การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของไอออนฟอสเฟต ที่มาจากการใช้ปุ๋ยในภาคการเกษตร รวมทั้งจากน้ำเสียชุมชน ในการกำจัดฟอสเฟตจากแหล่งกำเนิดไม่แน่นอนทำได้ยาก สำหรับวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน คือการใช้พืชน้ำบำบัด เช่น ระบบบึงประดิษฐ์ หรือใช้พืชลอยน้ำ และวิธีทางเคมีโดยการใส่สารเคมี เพื่อให้ไอออนฟอสเฟตตกตะกอน

ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยศึกษาการใช้ตะกอนสารส้มซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาใช้บำบัดไอออนฟอสเฟตในน้ำทิ้ง จากการศึกษาลักษณะของตะกอนสารส้ม พบว่าอุดมไปด้วยสารอนินทรีย์ ขาดสารอินทรีย์ และสารกลุ่มเส้นใย (fiber) ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช มีปริมาณสารออลูมิเนียมสูง และเนื้อดินเบาอุ้มน้ำ จะพองตัวได้เมื่อชุ่มน้ำ หากนำมาปรุงแต่งด้วยอินทรีย์สารหรือปุ๋ยในกลุ่มปุ๋ยหมัก และแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับพืชจะได้ดินวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการปลูกพืชได้ (ชัยวัฒน์, 2547) ดังนั้นตะกอนสารส้มจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนไอออนฟอสเฟต ก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต โดยดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในรูปแบบคอลัมน์
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟตระหว่างทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม
3. เพื่อศึกษาปริมาณไอออน ที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ดินตะกอน และรูปหรือชนิดต่างๆของไนโตรเจนในน้ำหลังผ่านคอลัมน์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ดินตะกอนที่ใช้ศึกษานำมาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน และโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ซึ่งเป็นตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำออก เก็บเพียงครั้งเดียวใช้ตลอดการทดลอง
2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากคูระบายน้ำบริเวณหลังหอพักนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (grab sampling) นำมาเติมสารละลายตะกั่ว สารละลายฟอสเฟต และซูโครส เพื่อให้ได้ตัวอย่างน้ำเสียที่มีปริมาณตะกั่ว 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีไอดี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. คอลัมน์ที่ใช้ศึกษาจำนวน 5 คอลัมน์ ได้แก่ คอลัมน์ทราย 1 คอลัมน์ คอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มอย่างละ 2 คอลัมน์ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน
4. ชนิดของไอออนที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ที่ศึกษา ได้แก่ ซัลเฟต คลอไรด์ และรูปหรือชนิดต่างๆของไนโตรเจนในน้ำที่ศึกษาคือ แอมโมเนีย ไนเตรต และอินทรีย์ไนโตรเจน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดปริมาณไอออนฟอสเฟตที่อาจปนเปื้อนออกมาจากน้ำทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้
2. สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับตะกอนสารส้ม และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนสารส้ม
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ที่มาของตะกอนสารส้มจากระบบผลิตน้ำประปา

เนื่องจากน้ำมีความสำคัญต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิต ในกระบวนการผลิตน้ำประปาจึงต้องมีความสะอาด ปลอดภัย โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำบางเขน และโรงผลิตน้ำสามเสนจะมีขั้นตอนดังนี้ (การประปานครหลวง, 2548)

#### 1) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ

ขณะน้ำดิบไหลตามคลองประปา น้ำดิบจะสัมผัสอากาศ และแสงแดด แล้วจะตกตะกอนตามธรรมชาติ ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ในระหว่างนั้นจะมีการกำจัดถุงพลาสติก เศษไม้ สาหร่าย ขยะ ด้วยตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียดกันไว้ที่หน้าสถานีสูบน้ำดิบ เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเหล่านี้เข้าสู่กรรมวิธีการผลิตน้ำประปา

#### 2) การเติมสารเคมี

ก่อนน้ำดิบจากคลองประปาจะถูกสูบส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนจะมีการเติมสารเคมีในท่อลำเลียงน้ำดิบ คือ ปูนขาว (Lime) เรียกว่า Pre-lime เพื่อปรับสภาพให้มีความเป็นด่างในน้ำดิบช่วยให้สารส้มทำปฏิกิริยาดีขึ้น และคลอรีน (Chlorine) เรียกว่า การเติมคลอรีนก่อนบำบัด (Pre-chlorination) เพื่อกำจัดสี กลิ่น ตะไคร่ ในน้ำดิบ

#### 3) การตกตะกอน

เมื่อเติมสารเคมีแล้ว น้ำดิบจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอน (Clarifier) ในขั้นตอนนี้สารเคมีจะถูกกวนให้สัมผัส และทำปฏิกิริยากับตะกอนหรือความขุ่นที่อยู่ในน้ำ จับเป็นก้อนเล็กๆแล้วค่อยๆมีขนาดโตขึ้นตกลงมาสู่ก้นถัง เหลือแต่น้ำใสไหลไปยังบ่อกรอง (Filter) สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ความขุ่นของน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนจะมีค่าความขุ่นไม่เกิน 5 หน่วยความขุ่น NTU. (Nephelometric Turbidity Unit) นอกจากนี้ยังมีการเติมสารส้ม (Alum) ในท่อแยกเข้าสู่ถังตกตะกอนในอัตราส่วนที่พอดี ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบในแต่ละฤดูกาล ซึ่งในช่วงฤดูน้ำหลากที่น้ำดิบมีความขุ่นสูง อาจจะมีการเติมสารช่วยเร่งการตกตะกอน (Poly-electrolyte) อีกด้วย

#### 4) การกรอง

น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลมายังบ่อกรองน้ำ ซึ่งมีผงถ่านแอนทราไซต์ และทรายกรองเป็นสารกรอง มีหัวกรอง (Filter Nozzle) เพื่อกรองเอาตะกอนที่ละเอียดออกอีกครั้งหนึ่ง น้ำที่ผ่าน

การกรองแล้วจะใส่มาก มีความขุ่นไม่เกิน 2 หน่วยความขุ่น ถังกรองที่ใช้เป็นแบบชนิดกรองเร็ว เมื่อใช้งานได้ประมาณ 48 ชั่วโมง จะต้องมีการล้างกลับ (Back Wash) โดยการผันลม และน้ำขึ้นมา จากใต้บ่อกรอง เพื่อให้ทรายขยายตัว และให้ตะกอนที่อยู่ติดหน้าผิวทรายไหลตามน้ำออกไปใช้เวลา ในการล้างประมาณ 15 นาทีต่อ 1 บ่อ

#### 5) การฆ่าเชื้อโรค

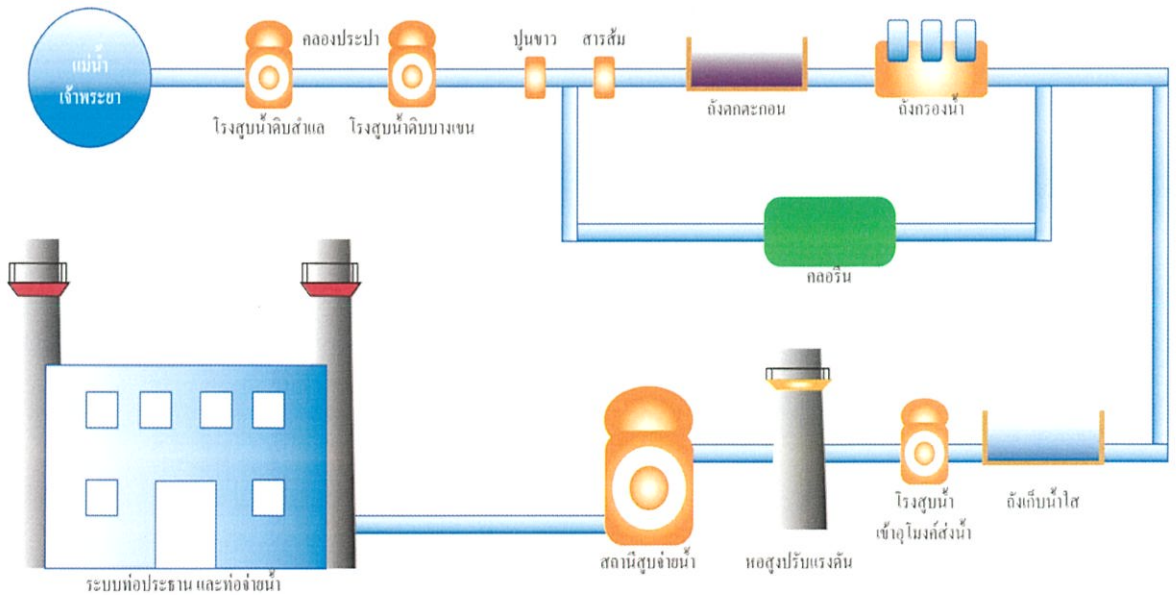
น้ำที่ได้จากยังมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อการ บริโภค (ตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO)) โดยจะเติมคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อ โรค (Post-Chlorination) ซึ่งสามารถฆ่าเชื้อโรคได้เกือบทุกชนิด และจะทำลายสารอินทรีย์ กลิ่น สี และเหล็กได้ที่สำคัญยังมีคลอรีนหลงเหลือ (Free Residual Chlorine) ติดไปกับน้ำ เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่ อาจปนเปื้อนเข้ามาภายหลังได้

#### 6) การปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา

หลังจากการฆ่าเชื้อโรคแล้ว จะมีการเติมปูนขาว (Post-lime) ลงไปอีกเล็กน้อย เพื่อป้องกันการ กัดกร่อนของเส้นท่อประปาที่จะส่ง และลำเลียง

#### 7) การสูบน้ำประปา

น้ำประปาที่ผลิตได้จะถูกสูบส่งเข้าอุโมงค์ส่งน้ำ และท่อส่งน้ำขนาดใหญ่ไปยังสถานีสูบน้ำตามย่านชุมชนต่างๆ แล้วสูบน้ำเข้าเส้นท่อประปา และเส้นท่อจ่ายน้ำ เพื่อบริการประชาชนต่อไป



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (การประปานครหลวง, 2548)

## 2.2 สารส้มและตะกอนสารส้ม

สารส้ม หรือ อะลัม (alum) คือสารประกอบไฮเดรตเค็ดโพแทสเซียมอลูมิเนียม (โพแทสเซียมอะลัม) สูตรเคมีว่า  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  หรือหมายถึงกลุ่มของสารประกอบอื่นๆ ในสูตร  $AB(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  ซึ่งถูกเรียกว่าสารส้มเช่นกัน

ในการทำน้ำดิบให้กลายเป็นน้ำใสต้องมีการเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน โดยสารที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือสารส้มเนื่องจากมีประจุบวกมาก และมีราคาถูกกว่าสารชนิดอื่น โดยอาจใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) แทนสารส้มหรือเฟอร์ริกซัลเฟต ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) แทนสารส้มได้เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำดิบ สารส้มจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ (Hydrolysis) โดยมีปฏิกิริยาทางเคมี ดังนี้ (Hannah และคณะ, 2510)



ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว การทำปฏิกิริยากับน้ำดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $Al(OH)_3$



คุณสมบัติทั่วไปของตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา

- 1) อุดมด้วยสารอินทรีย์
- 2) ขาดสารอินทรีย์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช
- 3) ขาดสารกลุ่มใยอาหาร (fiber)
- 4) มีปริมาณสารอลูมิเนียมสูงกว่าดินทั่วไป สารอลูมิเนียมดังกล่าวได้มาจากการใช้สารส้มเป็นตัวตกตะกอน
- 5) ปริมาณมวลสารที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน
- 6) มีปริมาณตะกอนดินปริมาณมากเพียงพอที่จะเป็นวัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรม
- 7) ตะกอนดินมีคุณสมบัติเป็นเนื้อดินเบาอุ้มน้ำจะพองตัวได้เมื่อชุ่มน้ำ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆในตะกอนสารส้ม

Chemical composition	Unit	Amount
Aluminum ( as Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	mg/g	458-463
Iron ( as Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	mg/g	11.9-12.3
Calcium ( as CaO )	mg/g	11.6-11.7
Magnesium ( as MgO )	mg/g	7.4-7.6
Humic acid ( as TOC )	mg/g	96.4-98.5
Cl <sup>-</sup>	mg/g	16.0-16.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/g	8.2-8.4
SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/g	10.6-11.8
H <sub>2</sub> O at 105°C (moisture content )	%	10.2
H <sub>2</sub> O at 1000°C	mg/g	260-270

ที่มา : (การประปานครหลวง, 2548)

### 2.3 ลักษณะน้ำเสียชุมชน

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสารใดๆ หรือสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงปรารถนาเจือปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ จะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไป จนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง รวมทั้งสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็น และเชื้อโรคต่างๆองค์ประกอบของน้ำเสีย มีดังนี้

1) สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว น้ำแกง เศษใบตอง พืชผัก ชันเนื้อ เป็นต้น ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้ โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) ลดลงเกิดสภาพเน่าเหม็นได้ ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำนิยมนวัดด้วยค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD) เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก และสภาพเน่าเหม็นจะเกิดขึ้นได้ง่าย

2) สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คลอไรด์ซัลเฟต เป็นต้น

3) โลหะหนักและสารพิษ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร เกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น พรอท โครเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารมลพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ ตู้-ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น

4) น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสง และกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ

5) ของแข็ง เมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเงิน มีความขุ่นสูง มีผลกระทบต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ

6) สารก่อให้เกิดฟองหรือสารซักฟอก ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ ฟองจะกีดกันการกระจายของออกซิเจนในอากาศสู่น้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

7) จุลินทรีย์ น้ำเสียจากโรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ หรือโรงงานอาหารกระป๋อง จะมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก จุลินทรีย์เหล่านี้ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตสามารถลดระดับของออกซิเจนละลายน้ำ ทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็น นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อประชาชน เช่น จุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงพยาบาล

8) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโต และเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในช่วงกลางคืน อีกทั้งยังทำให้เกิดวัชพืชน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาแก่การสัญจรทางน้ำ

9) กลิ่นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน หรือกลิ่นอื่น ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานทำปลาป่น โรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น

น้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และการประกอบอาชีพ ได้แก่ บ้านพักอาศัย ภัตตาคาร ร้านอาหาร โรงแรม โรงเรียน ตลาด เป็นต้น โดยน้ำเสียดังกล่าวเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การอุปโภคบริโภค การชำระล้างร่างกาย การซักล้าง และการประกอบอาหาร เป็นต้น น้ำเสียเหล่านี้มักปนเปื้อนสารอินทรีย์ แบคทีเรีย น้ำมัน และไขมัน ลักษณะ และปริมาณของน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดชุมชน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะ และปริมาณของน้ำเสียชุมชน

ลักษณะน้ำเสียชุมชน				
พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	มก./ล.	350	720	1200
ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids)	มก./ล.	250	500	850
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	มก./ล.	100	220	350
2. ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มล./ล	5	10	20
3. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand;BOD)	มก./ล.	110	220	400
4. ค่าซีโอดี (chemical Oxygen Demand;COD)	มก./ล.	250	500	1000
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N)	มก./ล.	20	40	85
อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	มก./ล.	8	15	35
แอมโมเนีย (Free ammonia)	มก./ล.	12	25	50
ไนไตรต์ (Nitrites)	มก./ล.	0	0	0
ไนเตรต (Nitrate)	มก./ล.	0	0	0
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P)	มก./ล.	4	8	15
สารอินทรีย์ (Organic)	มก./ล.	1	3	5
สารอนินทรีย์ (Inorganic)	มก./ล.	3	5	10
7. คลอไรด์ (Chloride)	มก./ล.	30	50	100
8. ซัลเฟต (Sulfate)	มก./ล.	20	30	50
9. สภาพด่าง (Alkalinity as CaCO <sub>3</sub> )	มก./ล.	50	100	200
10. ไขมัน (Grease)	มก./ล.	50	100	150

ที่มา : (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของน้ำเสียชุมชนจากอาคารประเภทต่างๆ

ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ		
ประเภทอาคาร	หน่วย	ลิตร/วัน-หน่วย
อาคารชุด/บ้านพัก	ยูนิต	500
โรงแรม	ห้อง	1,000
หอพัก	ห้อง	80
สถานบริการ	ห้อง	400
หมู่บ้านจัดสรร	คน	180
โรงพยาบาล	เตียง	800
ภัตตาคาร	ตารางเมตร	25
ตลาด	ตารางเมตร	70
ห้างสรรพสินค้า	ตารางเมตร	5.0

ที่มา : (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

## 2.4 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีเคมี

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนประกอบด้วยสารประกอบด้วยออร์โธฟอสเฟต และ โพลีฟอสเฟต รวมกัน ประมาณร้อยละ 70-90 ฟอสฟอรัสที่เหลือจะรวมอยู่กับสารอินทรีย์ในรูปต่างๆ การกำจัดฟอสฟอรัสสามารถทำได้โดยวิธีทางชีวภาพหรือวิธีเคมี การกำจัดฟอสฟอรัสวิธีทางชีวภาพโดยปกติจะเกิดขึ้นน้อย และต้องใช้วิธีทางเคมี ได้แก่ การตกตะกอนผลึก การตกตะกอน และการดูดซับสารเคมีที่สามารถใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส ได้แก่ สารส้ม เกลือของเหล็ก และปูนขาว (อุบลวรรณ , 2536) การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี ที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้มาอยู่ในรูปของตะกอน ซึ่งจะแยกออกจากสารละลายโดยการตกตะกอนทางเคมีซึ่งอยู่กับสถานะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายของสารนั้นๆ ซึ่งกระบวนการตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) เพราะการตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารลงไป在水里 เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นตะกอนที่ใหญ่และหนักจมตัวได้ดี ส่วนใหญ่ในโคแอกกูเลชันเป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สิ่งสกปรกที่เป็นตะกอนขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ ในทางปฏิบัติการตกตะกอนทางเคมีมักถูกเรียกรวมๆว่าเป็นโคแอกกูเลชัน

ในอดีตที่ผ่านมาการตกตะกอนทางเคมี ถูกใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และบีโอดีนับตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 เป็นต้นมาได้มีการพัฒนานำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารอาหาร เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่อยู่ในน้ำเสีย โดยสารที่นิยมใช้ในการตกตะกอนมีหลายชนิด ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

สารเคมี	สูตรเคมี	น้ำหนักโมเลกุล	ความหนาแน่น (ปอนด์ต่อลบ.ฟุต)	
			น้ำหนักแห้ง	น้ำหนักเปียก
สารส้ม	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666.7	60-75	78-80 (49%)
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	594.3	60-75	83-85 (49%)
เฟอร์ริกคลอไรด์	$FeCl_3$	162.1		84-93
เฟอร์ซัลเฟต	$Fe_2(SO_4)_3$	400		
	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 3H_2O$	454		70-72
เฟอร์รัสซัลเฟต	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278	62-66	
ปูนขาว	$Ca(OH)_2$	56 ในรูป CaO	35-50	

ที่มา : (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

## 2.5 การกำจัดฟอสเฟสในน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพ และเคมี

รูปแบบการดูดซับทางกายภาพเป็นการทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ กับ โมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวถูกดูดซับ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น โดยใช้สารดูดซับ (adsorbent) เป็นการดูดซับฟอสเฟตอื่นๆ มากำจัดฟอสฟอรัสซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 99% ในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย อีกทั้งวิธีการในการ

กำจัดฟอสฟอรัสยังไม่ยุ่งยากจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญที่จะประยุกต์ใช้การกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพในการบำบัดน้ำเสีย

ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนกำหนดไว้ว่าต้องมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus) ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	
พารามิเตอร์	มาตรฐาน
1.ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5.5-9.0
2. บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร
6. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ที่มา : (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

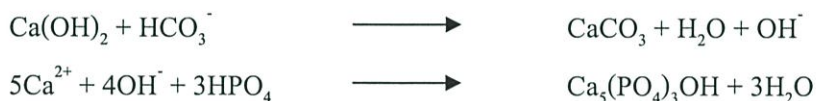
วิธีการกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการทางกายภาพเคมี ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองคือ การตกตะกอนผลึก (Chemical Precipitation) ซึ่งจะใช้สารเคมีที่ช่วยในการตกตะกอนจับฟอสเฟตในน้ำแล้วทำการแยกตะกอนที่ประกอบด้วยสารประกอบฟอสเฟตออกจากน้ำทิ้งด้วยถังทำใส (Clarifier) หรือถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) สารเคมีที่ใช้โดยทั่วไป เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ ซัลเฟตเฟอริกคลอไรด์ ซัลเฟต และสารส้ม เป็นต้น ซึ่งวิธีการนี้ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงจากการเติมสารเคมีจำนวนมากเพื่อการจัดฟอสฟอรัส และตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ปัจจัยในการเลือกใช้สารเคมีสำหรับการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ปริมาณสารแขวนลอย และคอลลอยด์ ปริมาณค่า (Alkalinity) ราคาสารเคมี การจัดการตะกอน ความเหมาะสมการติดตั้งระบบ

เทคโนโลยีการแยกฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียที่เป็นที่ให้ความสนใจ และทำการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง คือ การตกตะกอนผลึกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium Phosphate หรือ Apatite) และการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate: MAP) หรือ สตรูไวท์ (Struvite)

เนื่องจากการตกตะกอนผลึกของสารประกอบฟอสเฟตดังกล่าวสามารถนำเอาสารอาหารของพืช เช่น ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน ที่อยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นปุ๋ยที่ใช้ในการทำการเกษตรกรรม หรือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทำปุ๋ยที่จะทดแทนแร่หินฟอสเฟตที่กำลังจะหาได้ยากขึ้นในอนาคต ดังนั้นถ้าการตกตะกอนฟอสเฟตมีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายสารเคมีต่ำ และมีการลงทุนในการติดตั้งระบบไม่สูงมากก็จะเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ วิธีดังกล่าวนอกจากจะเป็นการสร้างมูลค่าจากน้ำทิ้งโดยการแยกสารอาหารที่เป็นประโยชน์กลับมาใช้ประโยชน์ ยังเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากปัญหาการปนเปื้อนจากธาตุอาหารของพืชในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน

#### 1) การตกตะกอนผลึกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium Phosphate)

การตกตะกอนผลึกแคลเซียมฟอสเฟต สามารถทำได้โดยการเติมปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งเป็นวิธีนิยมใช้กันในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสดังสมการที่ 5.20 และ 5.21 การเกิดปฏิกิริยาเคมีฟอสเฟตจะตกตะกอนผลึกออกมาในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ (Calcium hydroxyapatite) ที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงระหว่าง 7-9



กระบวนการตกผลึกฟอสเฟตวิธีนี้มีได้เกิดขึ้นโดยอาศัยปฏิกิริยาข้างต้นเท่านั้นสารประกอบฟอสเฟตในรูปอื่นๆ เช่น โพลีฟอสเฟต อาจถูกกำจัดโดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ของไฮดรอกซีอะพาไทท์ (Hydroxyapatite) ที่เกิดขึ้นจากการตกผลึกฟอสเฟต และเมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้น ( $\text{pH} > 10$ ) ไฮดรอกซีอะพาไทท์จะเกิดการตกผลึกมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการแยกฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียเพิ่มสูงมากขึ้นเพื่อพีเอชมีค่าสูงมากกว่า 11.5 ทั้งนี้ปริมาณสารเคมีที่เติมเพื่อการตกตะกอนผลึกจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจากปูนขาวอาจเกิดการตกตะกอนกับแมกนีเซียมในน้ำ กลายเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) อีกด้วย

โดยปัจจัยการเกิดผลึกฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ และสภาวะการอิ่มตัว (Supersaturation) สิ่งเจือปนในน้ำเสีย เป็นต้น โดยผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์เป็นผลึกแคลเซียมฟอสเฟตที่มีความเสถียร และเป็นรูปแบบผลึกเกิดขึ้นส่วนใหญ่ในระบบบำบัดน้ำเสียโดยการกำจัดฟอสฟอรัส นอกจากนี้การเกิดผลึกอะพาไทท์นั้นจะเกิดการตกตะกอนได้ตั้งแต่ในช่วงค่าพีเอชที่เป็นด่างอ่อน ( $\text{pH} = 8.0 - 9.8$ ) ณ อุณหภูมิห้อง

#### 2) การตกตะกอนผลึกแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (MAP)

การตกตะกอนผลึกแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต หรือ MAP เป็นการควบคุมแมกนีเซียมแอมโมเนีย และฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำเสียให้รวมตัวเกิดเป็นผลึกของแข็ง และตกตะกอนแยกออกมา โดยควบคุมอัตราส่วนโมลของสารต่างๆ ค่าพีเอช หรือค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และ

ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องให้มีความเหมาะสมต่อการตกผลึกนอกจากจะเป็นการกำจัดฟอสเฟต และ แอมโมเนียออกจากรูน้ำเสียได้ในขั้นตอนเดียวอีกด้วย ตะกอนผลึก MAP นับได้ว่าเป็นผลพลอยได้ที่ สร้างมูลค่า เนื่องจากตะกอนผลึกดังกล่าวมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าสำหรับการ เกษตร หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนแร่หินฟอสเฟตในอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยฟอสเฟต



### 3) ปัจจัยของการเกิดผลึกแมกนีเซียม-ฟอสเฟต

การกำจัดหรือแยกฟอสฟอรัสออกจากรูน้ำเสีย โดยการตกตะกอนผลึก MAP เป็นการ ใช้กระบวนการตกตะกอนหรือตกผลึกทางเคมี เพื่อกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียม ออกจากน้ำเสีย โดยใช้แมกนีเซียม เป็นตัวประสานให้เกิดเป็นผลึกของแข็ง และตกตะกอนแยกออกจากรูน้ำเสีย ปัจจัยในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพีเอชของน้ำอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม สิ่งเจือปน และอื่นๆ

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การนำตะกอนสารส้มมาบำบัดฟอสเฟต

Y.Q. Zhao และคณะ (ค.ศ.2007) ศึกษาวิจัยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ ตะกอนสารส้ม ด้วยวิธีเบตซ์และคอลัมน์ โดยศึกษากลไกการดูดซับและการแตกตัวของตะกอน สารส้มในสารละลายฟอสเฟต (hydrolysis) ผลการศึกษาพบว่า ความจุในการดูดซับมีค่าลดลงจาก 3.5 เป็น 0.7 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อกรัมตะกอนแห้ง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 4.3 เป็น 9.0 และการดูดซับ เป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์ โดยอนุมูลฟอสเฟตเข้าไปแทนที่ไอออนต่างๆที่จับอยู่ที่ผิวของ ตะกอนสารส้ม ด้วยปฏิกิริยาแทนที่ (ligand exchange) และการตกตะกอน (precipitation)

Y. Yang และคณะ (ค.ศ. 2011) ศึกษาการใช้ตะกอนสารส้มกำจัดซีโอดี บีโอดี ในโตรเจน และ ฟอสฟอรัส จากน้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ระบบเวทแลนด์แบบอนุกรม (a laboratory-scale multi-stage constructed wetland, CW) ใช้การป้อนน้ำเสียโดยปล่อยน้ำให้ไหล ลงมา (tidal flow) เพื่อเพิ่มโอกาสในการเติมอากาศให้ระบบเพื่อกระตุ้นให้สารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ และไนโตรเจนเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ดำเนินการร่วมกับการปล่อยน้ำแบบเป็นขั้น (Step feed) เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนสำหรับการเกิดปฏิกิริยาคีโนรีฟิเคชัน (Denitrification) มีอัตราภาชนะ น้ำเข้า (HLR) 1.0 และ 1.26  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  ผลปรากฏว่า ตะกอนสารส้มทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ฟอสฟอรัสจึงสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ ในขณะเดียวกันก็มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และสารอินทรีย์สูง สังเกตได้จากการที่มีแบคทีเรียเจริญเติบโตบนผิวหน้าของตะกอน สารส้ม นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี บีโอดี

ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเท่ากับ  $12.3\%$ ,  $67.8 \pm 9.2\%$ ,  $33.6 \pm 17.0\%$  และ  $99.5 \pm 0.49\%$  ตามลำดับ

D. Sirisha และคณะ (ค.ศ. 2012) ศึกษาการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) โดยใช้ตะกอนสารส้มเป็นตัวดูดซับ พบว่าสามารถดูดซับได้  $100\%$  ที่ความเข้มข้นต่ำๆ และ  $89\%$  ที่ความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งการศึกษาจะพิจารณา เวลาสัมผัส (contact time) ขนาดของอนุภาคความเข้มข้นเริ่มต้น และปริมาณตะกอนสารส้มพบว่าเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 50 นาที และเปอร์เซ็นต์การกำจัด  $\text{SO}_2$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง จะสามารถกำจัด  $\text{SO}_2$  ได้มากขึ้น และเมื่อค่อยๆเพิ่มปริมาณตะกอนสารส้ม พบว่า  $\text{SO}_2$  จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา และปฏิกิริยาจะดำเนินช้าลงเมื่อปริมาณตะกอนสารส้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักสมดุล (ระหว่างตะกอนสารส้ม และ  $\text{SO}_2$ )

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)

สุธน ธนพิทักษ์ (2545) ได้ศึกษาวิจัยการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตะกอนสารส้มที่นำมาจากการผลิตน้ำประปา ด้วยวิธีการตกตะกอนเคมี พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ที่ช่วง 5 ถึง 7 โดยที่พีเอช 6 มีความเหมาะสมมากที่สุด ตะกอนสารส้มสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตโดยการห่อหุ้มคอลลอยด์ฟอสเฟต และตกตะกอนภายใต้การสร้างตะกอนแบบห่อหุ้มผลึก

ชนิษฐา เซะวิเศษ และคณะ (พ.ศ.2555) ศึกษาการนำตะกอนสารส้มจากโรงผลิตน้ำประปา มากำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการแบบเบตช์ (batch test) ผลการศึกษาพบว่า สภาวะพีเอชที่เหมาะสมคือ 6.0 และเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ  $98\%$  และเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนสารส้ม สามารถกำจัดฟอสเฟตในสารละลายได้มากขึ้นขณะที่ไอออนคลอไรด์ ซัลเฟต และพีเอชของสารละลายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ที่ผิวของตะกอนสารส้ม (ligand exchange) ของไอออนต่างๆ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) คลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) และอินทรีย์วัตถุ

## 2.6.2 การนำตะกอนสารส้มกลับมาใช้ประโยชน์

Y.Q. Zhao และคณะ (ค.ศ. 2008) ศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของการใช้กากตะกอนสารส้มเป็นสารตั้งต้นในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ Reed bed ในลักษณะการไหลในแนวนอนและแนวตั้ง โดยแนวนอนจะปลูกต้นอ้อเล็ก (*Phragmites australis*) คลุมไว้ ในขณะที่แนวตั้งจะไม่ปลูกพืช งานวิจัยนี้ครอบคลุมถึงความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนพื้นผิว และความเป็นไปได้ในการปล่อยสารบางตัวจากตะกอน เช่น  $Al^{3+}$  จากการศึกษาพบว่าโมเดลแบบแนวตั้ง (ไม่ปลูกต้นไม้) สามารถยับยั้งการชะของฟอสฟอรัสได้ 99.5% ลดค่าซีโอดีได้ 25% และโมเดลแนวนอนกำจัดบีโอดีได้ 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  $0.03 - 0.11 \text{ mg/L}$  ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานถือว่าไม่มีนัยสำคัญ แม้ว่าจะไม่มีปัญหาในการเดินระบบ เช่น การชะของ  $Al^{3+}$  หรือการอุดตัน แต่การศึกษาในระยะเวลานานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี 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) ได้ทำการศึกษาการนำสารส้มจากตะกอนระบบผลิตน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT) พบว่าสามารถทำได้โดยการเติมกรดซัลฟิวริกในสารละลาย 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  $14.3 \text{ mg P/gsludge}$  และ  $13.1 \text{ mg P/gsludge}$  และหากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟอสเฟตในปริมาณที่มากขึ้น ควรจะทำการศึกษาความจุของการดูดซับของตะกอนสารส้ม เนื่องจากคุณภาพของน้ำดิบจะมีผลกระทบต่อลักษณะของตะกอนและมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับ

ปริฉัตร คำแท้ และคณะ (2554) ศึกษาวิจัยการกำจัดไอออน โครเมียม และสารลดแรงตึงผิวประจุลบ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตะกอนสารส้มจากระบบผลิตน้ำประปา โดยทำการศึกษา 2 สภาวะ คือ การปรับพีเอชน้ำเสียก่อนเติมตะกอนสารส้ม และการปรับพีเอชน้ำเสียหลังเติมตะกอนสารส้ม พบว่าเมื่อปริมาณตะกอนสารส้มในน้ำเสียมากขึ้นจะทำให้ค่าพีเอช ประสิทธิภาพการกำจัดไอออน โครเมียม และค่าความขุ่นมีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสารลดแรงตึงผิวประจุลบจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ปริมาณตะกอนสารส้ม 20 และ 24 กรัมต่อลิตร

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์ และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AUX220
3. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV) ยี่ห้อ Thermo รุ่น Genesys 10s UV-vis
4. ตู้อบ (Drying Oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP
5. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ยี่ห้อ Fisher Scientific
6. เครื่องกลั่นไนโตรเจน Gerhardt รุ่น KI
7. เครื่องปั่นกวนยี่ห้อ Consort รุ่น C860
8. เครื่องบดคินยี่ห้อ BOSCO พร้อมตะแกรงแยก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร
9. เครื่องแก้ว
10. อุปกรณ์สำหรับไทเทรต
11. ขวดพลาสติกใส่สารตัวอย่าง

##### 3.1.2 สารเคมี

1. ซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ ) จาก Fisher Scientific ชนิด Analytical reagent grade
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) จาก Ajax FinechemPty.Ltd ชนิด Analytical reagent grade
3. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต ( $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) จาก Unilab ชนิด Analytical reagent grade
4. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
5. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ (Anhydrous)) จาก Fisher Scientific ชนิด Analytical reagent grade
6. โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) จาก Ajax FinechemPty.Ltd ชนิด Analytical reagent grade
7. บรูซีนซัลเฟต (Brucine sulfate) จาก Acros Organics ชนิด Analytical reagent grade
8. โพแทสเซียมไนเตรท ( $\text{KNO}_3$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade

9. โพแทสเซียมโครเมต ( $K_2CrO_4$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
10. แบเรียมคลอไรด์ ( $BaCl_2$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
11. โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$  (anhydrous)) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
12. โซเดียมอะซิเตต ( $CH_3COONa.3H_2O$ ) จาก Ajax FinechemPty.Ltd ชนิด Analytical reagent grade
13. โซเดียมเตตระบอเรต ( $Na_2B_4O_7.10H_2O$ ) จาก Ajax FinechemPty.Ltd ชนิด Analytical reagent grade
14. แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2.6H_2O$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
15. คอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
16. โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ) จาก Fisher Scientific ชนิด Analytical reagent grade
17. ฟีนอล์ฟทาเลอิน อินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
18. เมทิลเรด (methyl red) จาก Fisher Scientific ชนิด Analytical reagent grade
19. เมทิลีนบลู (methylene blue) จาก Fisher Scientific ชนิด ACS reagent
20. โซเดียมไธโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3.5H_2O$ ) จาก Ajax FinechemPty.Ltd ชนิด Analytical reagent grade
21. กรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) จาก Ajax FinechemPty.Ltd ชนิด Analytical reagent grade
22. กรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) จาก LobaChemie Pvt. Ltd. ชนิด Analytical reagent grade
23. กรดแอสคอร์บิก ( $C_6H_8O_6$ ) จาก LobaChemie Pvt. Ltd. ชนิด Analytical reagent grade
24. กรดซัลฟานิลิก ( $C_6H_7NO_3S$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
25. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. $H_2SO_4$ ) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
26. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc. $HNO_3$ ) จาก Carlo ERBA (Italy) ชนิด Analytical reagent grade
27. สารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1,000 ppm จาก BDH ชนิด AAS grade
28. อลูมิเนียมซัลเฟต ( $Al_2(SO_4)_3$ ) จาก Carlo ErbaCo.,Ltd ชนิด Analytical reagent grade
29. น้ำกลั่น
30. น้ำตาลทรายขาว ยี่ห้อ มิตรผล

### 3.2 ลักษณะตะกอน และน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 การเตรียมดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

นำดินตะกอนที่เก็บจากลานตากตะกอนของโรงผลิตน้ำบางเขนในเดือนพฤษภาคม 2555 และตะกอนจากเครื่องรีดตะกอนของโรงผลิตน้ำสามเสน ซึ่งเก็บในเดือนพฤษภาคม 2556 มาทำให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลมให้แห้ง (Air dried) แล้วบดดินตะกอนที่แห้งด้วยเครื่องบดดิน ร่อนดินที่บดด้วยตะแกรงขนาด 0.5 cm จะได้ตัวอย่างดินสำหรับบรรจุคอลัมน์ที่ 2 และ 3 สำหรับดินตะกอนผสมสารส้ม เตรียมได้โดยละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต เข้มข้น 120 mg/L ผสมกับดินตะกอนที่ผ่านการทำให้แห้งและบดแล้ว ในอัตราส่วนดินตะกอนต่อสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต 1.35: 1 โดยมวลต่อปริมาตร แซ่ทิ้งไว้ 3 คืน นำไปทำให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลมจะได้ดินตะกอนผสมสารส้มที่มีสารส้ม เข้มข้น 120 mg/L เป็นตัวอย่างดินสำหรับบรรจุในคอลัมน์ที่ 4 และ 5

#### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสีย

เก็บน้ำเสียจากชุมชนน้ำบริเวณหลังหอพักนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (grab sampling) กำหนดจุดเก็บ 1 จุดที่พิกัด 13.729967 °N 100.773565 °E โดยเก็บทุกสองสัปดาห์ ครั้งละ 60 L นำมาเติมสารละลายตะกั่วไนเตรต สารละลายซูโครส (น้ำตาลทราย) และสารละลายฟอสเฟต เพื่อให้ น้ำเสียมีความเข้มข้นตะกั่ว 30 mg/L ฟอสเฟต 25 mg/L และซีโอดี 300 mg/L สำหรับใช้ในการทดลอง

#### 3.2.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย

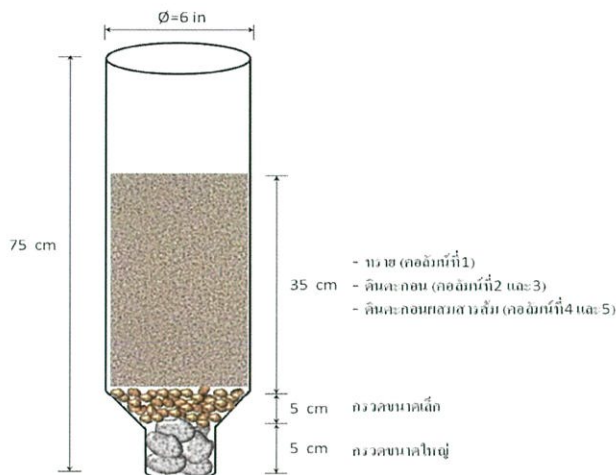
น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ถึงสมบัติบางประการ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำการทดลองและเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.1

### ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการ/ เครื่องมือวิเคราะห์
1. ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
2. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	ย่อย และเทียบสีกับกรดแอสคอบิกหาปริมาณด้วยเครื่อง UV (4500 E; AWWA, 2012)
3. ปริมาณออร์โธฟอสเฟต	เทียบสีกับกรดแอสคอบิกหาปริมาณด้วยเครื่อง UV (4500 E; AWWA, 2012)
4. ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน	กลั่น และไทเทรตหาปริมาณเครื่องกลั่นไนโตรเจน (4500 C; AWWA, 2012)
5. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	ย่อย กลั่น และไทเทรตหาปริมาณเครื่องกลั่นไนโตรเจน (4500 B; AWWA, 2012)
6. ปริมาณไนเตรตไนโตรเจน	เทียบสีกับบลูซึ้น (4500 B; AWWA, 2012)
7. ปริมาณซัลเฟต	วัดความขุ่น ด้วยเครื่อง UV (4500 E; AWWA, 2012)
8. ปริมาณคลอไรด์	ไทเทรตตามหลักการอาร์เจนโทเมตริก (Argentometric Method) (4500 B; AWWA, 2012)

### 3.3 การเตรียมคอลัมน์

คอลัมน์ที่ใช้ทำจากท่อพีวีซี (PVC) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 cm ความยาว 60 cm จำนวน 5 ท่อ ประกอบด้วยคอลัมน์ควบคุม และคอลัมน์ตัวอย่างจำนวน 4 ท่อ สำหรับคอลัมน์ตัวอย่างภายในบรรจุกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 5 cm สูง 5 cm และดินตะกอนน้ำหนัก 6.58 kg สูง 35 cm ตามลำดับ สำหรับคอลัมน์ควบคุม ทำเช่นเดียวกับคอลัมน์ตัวอย่าง เปลี่ยนจากดินตะกอนมาเป็นทรายขนาดอนุภาค 2.0-0.05 mm แทน การบรรจุคอลัมน์ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการบรรจุคอลัมน์

### 3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดไอออนฟอสเฟต และปริมาณไอออนชนิดต่างๆที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์ตะกอนสารส้ม

ในการทดลองจะปล่อยน้ำเสียเข้าคอลัมน์แบบเป็นครั้ง โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อนเข้า และออกจากคอลัมน์ทุกๆ สัปดาห์ จำนวน 2 ตัวอย่างต่อหนึ่งคอลัมน์ นำไปวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอช ฟอสฟอรัสทั้งหมด ออโรฟอสเฟต แอมโมเนีย ไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรต ซัลเฟต และคลอไรด์ ในน้ำตัวอย่าง เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต และปริมาณไอออนต่างๆ ในน้ำเสียที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์ตะกอนสารส้ม ดังแผนผังที่ 3.2 แสดงวิธีการดำเนินงาน

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิจัยแล้วต้องนำผลมาวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติโดยแบ่งส่วนการวิเคราะห์ดังนี้

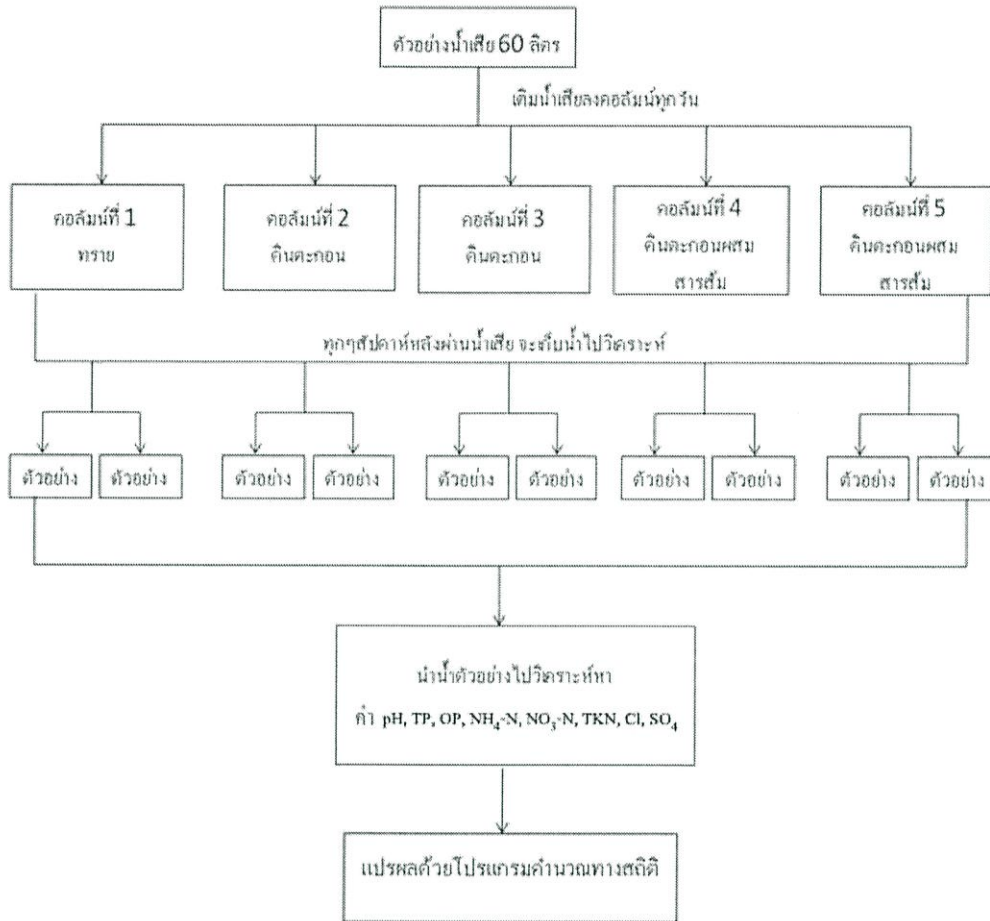
#### 3.5.1 สถิติพรรณนา

ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพีเอช ประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต ปริมาณ ซัลเฟต และคลอไรด์ ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

#### 3.5.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

โดยการทดสอบหาค่า Homogeneity of Variance ว่ามีความแปรปรวนต่างกันหรือไม่ โดยถ้าไม่มีความแตกต่างกันก็จะใช้ One-way Analysis of Variance และถ้าค่ามีความแปรปรวนแตกต่างกันใช้ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance เพื่อทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต ที่คอลัมน์ต่างกัน

#### 3.5.3 กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และอภิปรายผล

ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ดินตะกอนซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟต พร้อมศึกษาการชะละลายของไอออนซัลเฟต คลอไรด์ รวมทั้งชนิดหรือรูป (form) ต่างๆของไนโตรเจน ในน้ำเสียบริเวณหอพักนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนำน้ำเสียมาผ่านคอลัมน์ทั้งสามได้แก่ คอลัมน์ทราย คอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม เป็นเวลาทั้งหมด 71 วัน ทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำทั้งก่อน และหลังผ่านคอลัมน์

#### 4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟต

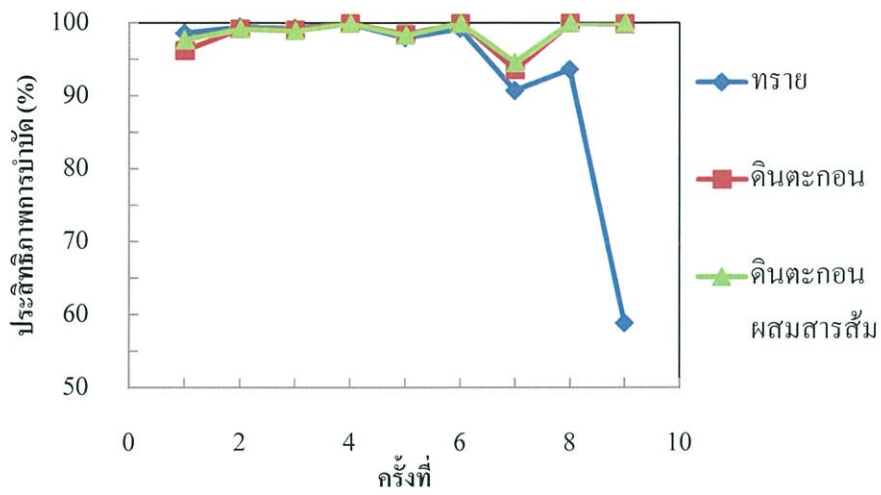
ทำการศึกษาปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก และนำไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัด จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่าในช่วงแรกของการทดลอง ในน้ำเสียที่ผ่านทุกคอลัมน์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าในน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทรายจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตลดลง ในขณะที่คอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตเท่าเดิม เนื่องจากในคอลัมน์ทรายอาจเกิดการอิ่มตัวประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลง เมื่อนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ที่ได้ในแต่ละคอลัมน์คือ 93.06%, 98.45% และ 98.69% ประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟต (OP) เท่ากับ 91.44%, 99.86% และ 99.85% สำหรับในน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มตามลำดับดังตารางที่ 4.1 และพบว่าในน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้มประสิทธิภาพที่ได้จากการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันโดยมากกว่าในน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทรายทั้งในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และออร์โธฟอสเฟต (OP) เนื่องจากในอนุภาคดิน และทราย มีส่วนประกอบที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น ซิลิกา อลูมิเนียม แคลเซียม เหล็ก เป็นต้น ไอออนฟอสเฟต( $PO_4^{3-}$ ) จึงสามารถเข้าไปแทนที่ไอออนต่างๆที่จับอยู่ที่พื้นผิวด้วยปฏิกิริยาแทนที่ (ligand exchange) และตกตะกอน (precipitation) อยู่ที่บริเวณผิวหน้าของทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มได้ โดยจากการทดลองแบบแบตช์ (Batch) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ที่ได้ใน

แต่ละแบบคือ 30.25%, 86.15% และ 81.23% ประสิทธิภาพในการบำบัดคอโรฟอสเฟต (OP) เท่ากับ 21.94%, 84.52, และ 80.13% สำหรับในทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ตามลำดับจากผลที่ได้จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดในทรายจะต่ำที่สุด ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดในดินตะกอนจะมากกว่าใน ดินตะกอนผสมสารส้ม เนื่องจากไอออนฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) นอกจากจะถูกจับอยู่ที่อนุภาคของดินแล้ว ยังอาจจะจับกับตะกอนสารส้มได้ เนื่องจากตะกอนสารส้มจะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ออกมาแล้วจับกับไอออนฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) เป็นสารประกอบเชิงซ้อน หรือก่อตัวห่อหุ้มเป็นผลึกคอลลอยด์ฟอสเฟต ทำให้ฟอสเฟตลดลง โดยจากการทดลองหาการดูดซับฟอสเฟตในดินที่มีออกไซด์ของเหล็ก และอะลูมิเนียมในปริมาณต่างกัน (เพิ่มพูน และคณะ, 2545) พบว่ายิ่งเติมปริมาณสารส้มลงไปมากจะทำให้ความเข้มข้นของ  $H^+$  และ  $SO_4^{2-}$  เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะไปขัดขวางไม่ให้  $Al$  ไปจับพันธะเคมีกับ  $PO_4^{3-}$  ได้สะดวกทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ได้ลดลง ดังนั้นจากผลการทดลองโดยนำน้ำเสียมาผ่านคอลัมน์ทั้งสามพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดในคอลัมน์ทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันอาจจะเกิดจากสภาวะในคอลัมน์ไม่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดกระบวนการบำบัดทางเคมีได้

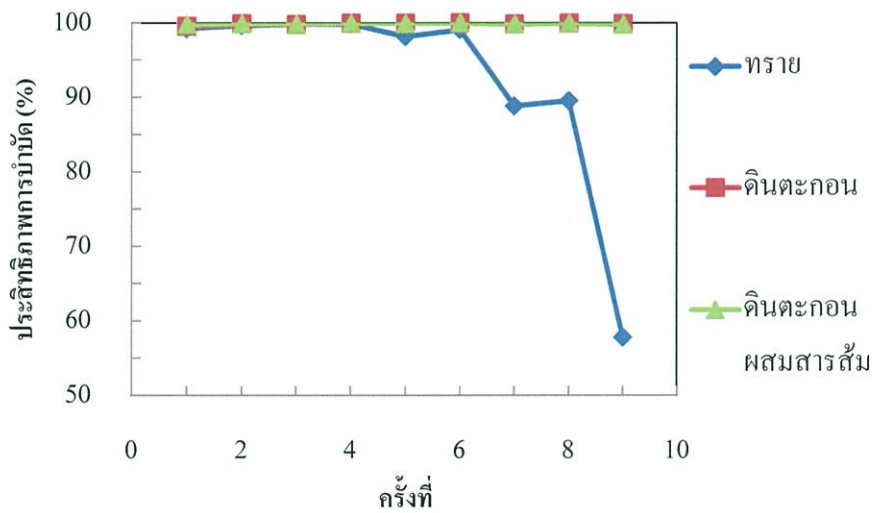
ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างโดยรวมด้วยวิธี Kruskal Wallis One-way analysis of Variance Method พบว่า เมื่อวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.616 ( $p > 0.05$ ) ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดคอโรฟอสเฟต (OP) นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.004 ( $p < 0.05$ ) ดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอช และประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

คอลัมน์	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) (%เฉลี่ย, S.D.)	93.06±13.09	98.30±2.11	98.35±1.78
ประสิทธิภาพการบำบัดคอโรฟอสเฟต (OP) (%เฉลี่ย, S.D.)	92.44±13.71	99.85±0.13	99.61±0.78
ค่าพีเอชดิน (%เฉลี่ย, S.D.)	6.66	6.15	6.23



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TP ในคอลัมน์ต่างๆ



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด OP ในคอลัมน์ต่างๆ

## 4.2 ผลการศึกษาการชะละลายของไอออนซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ )

### 4.2.1 ผลการศึกษาปริมาณไอออนซัลเฟต

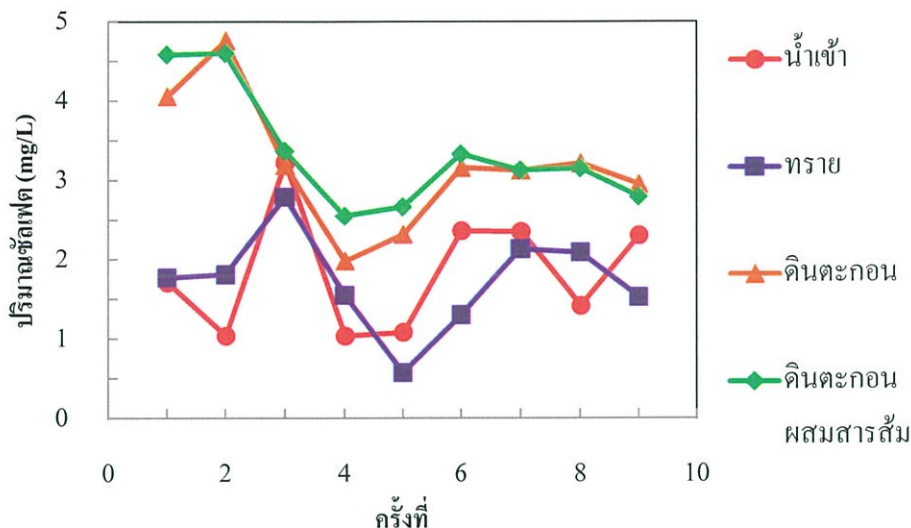
จากผลการศึกษาปริมาณซัลเฟตด้วยวิธีวัดความขุ่นด้วยเครื่องเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร จากรูปที่ 4.3 พบว่าในน้ำเข้าจะมีปริมาณซัลเฟตน้อยกว่าในคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แต่มากกว่าในคอลัมน์ดินทราย โดยมีค่าเท่ากับ 1.83 ขณะที่หลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมีค่าเท่ากับ 1.73, 3.19 และ 3.35 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากในคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีส่วนประกอบของสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียผ่านคอลัมน์ ไอออนซัลเฟตจะละลายออกมากับน้ำทำให้ปริมาณซัลเฟตที่วัดได้มากขึ้น

เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างโดยรวมด้วย Kruskal Wallis One-way analysis of Variance Method พบว่า เมื่อวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ปริมาณซัลเฟตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.001 ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ ค-2)

จากการพิจารณาว่าที่แตกต่างด้วยสถิติ Maan-Whitney U Test พบว่า คอลัมน์ทราย กับดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ปริมาณซัลเฟตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.000 ( $p < 0.05$ ) ส่วนคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีปริมาณซัลเฟตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.796 ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ ค-2)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณซัลเฟตในน้ำเข้า และน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

คอลัมน์	น้ำเข้า	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
ปริมาณซัลเฟต (%เฉลี่ย, S.D.) mg/L	1.83±0.77	1.73±0.61	3.19±0.83	3.35±0.76



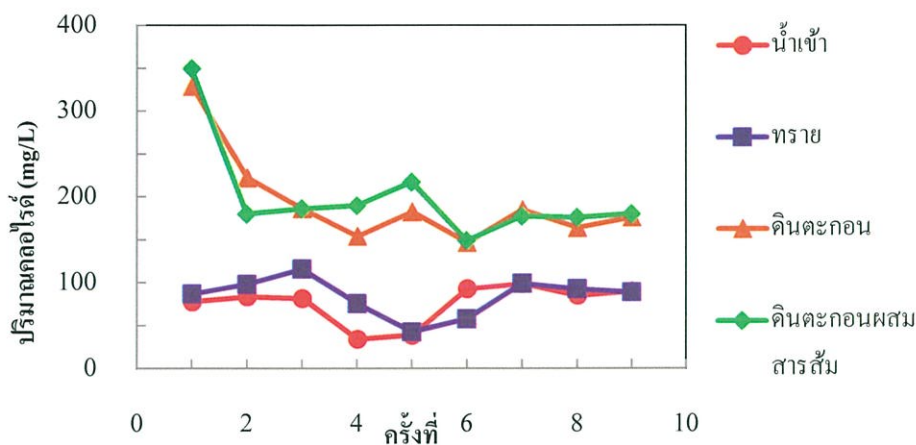
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณไอออนคลอโรฟิลล์ในคอลัมน์ต่างๆ

#### 4.2.2 ผลการศึกษาปริมาณไอออนคลอไรด์

จากผลการศึกษาคลอไรด์ด้วยวิธีอาร์เจนโทเมตริก (Argentometric Method) จากรูปที่ 4.4 พบว่าน้ำเข้าจะมีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่าคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมากโดยมีค่าเท่ากับ 75.88 ขณะที่หลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมีค่าเท่ากับ 84.21, 176.19 และ 179.91 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำประปามีการเติมคลอไรด์เพื่อการบำบัดน้ำ ทำให้มีเกลือคลอไรด์ปนเปื้อนในดินตะกอนเป็นจำนวนมากเมื่อมีการปล่อยน้ำเสียผ่านคอลัมน์ ไอออนคลอไรด์จึงละลายออกมากับน้ำทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้สูงเมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างโดยรวมด้วยวิธี Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า เมื่อวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ปริมาณคลอไรด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.000 ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ค-2)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณคลอไรด์ในน้ำเข้า และน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

คอลัมน์	น้ำเข้า	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
ปริมาณคลอไรด์ (%เฉลี่ย)	75.88	84.21	176.19	179.91
mg/L				



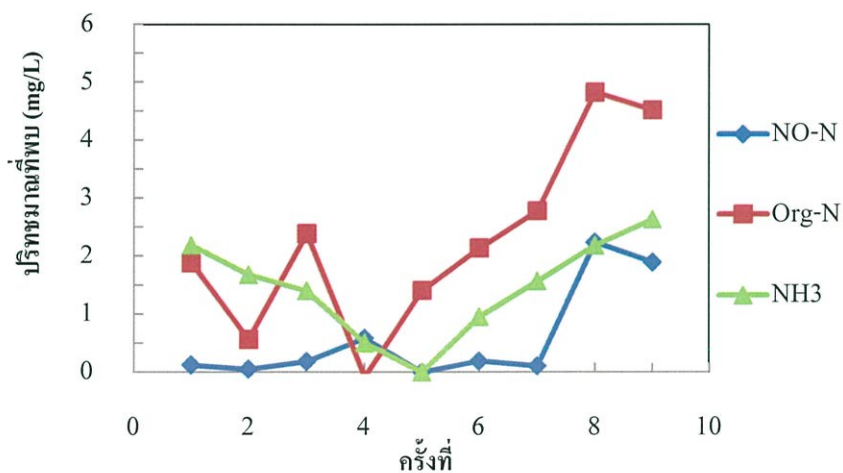
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณไอออนคลอไรด์ในคอลัมน์ต่างๆ

#### 4.3 ผลการศึกษารูปหรือชนิดต่างๆของไนโตรเจนในน้ำเสีย และน้ำหลังผ่านคอลัมน์

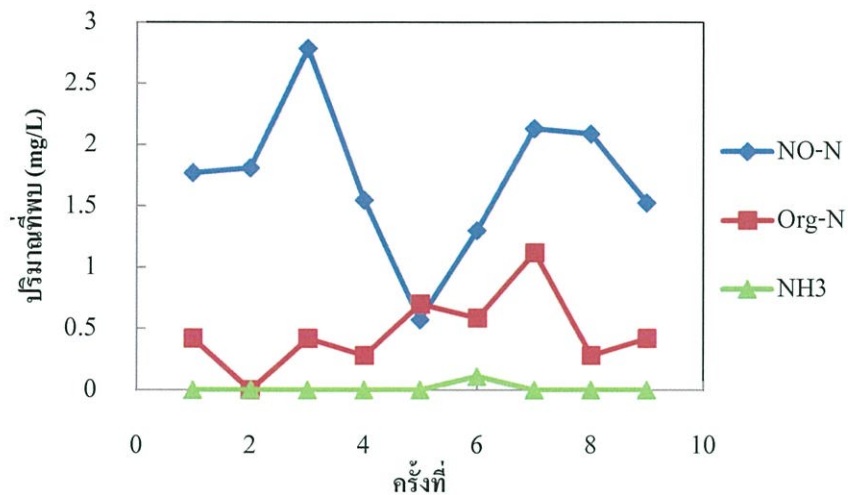
จากผลการศึกษาปริมาณไนโตรเจนทั้งในรูปไนเตรต-ไนโตรเจน ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) และอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) จากรูปที่ 4.5 พบว่าชนิดหรือรูปของไนโตรเจน (form) ในน้ำเสียที่เติมลงในคอลัมน์จะอยู่ในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียขณะที่ไนเตรตจะพบน้อยมาก หลังจากผ่านคอลัมน์ทั้ง 3 แบบ แอมโมเนียจะพบน้อยมาก อินทรีย์ไนโตรเจนลดลง ขณะที่ปริมาณไนเตรตเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.6-4.8 โดยในคอลัมน์ทราย ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันอาจเกิดได้ดีกว่าในคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม เนื่องจากอนุภาคทรายมีขนาดรูพรุนสูง (Arrak และคณะ, 2006) และน้ำที่เติมลงในคอลัมน์ไม่ได้มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ทำให้ภายในคอลัมน์เหมาะสมที่จะเกิดปฏิกริยาไนตริฟิเคชันได้ปริมาณไนเตรตในน้ำออกจึงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มธาตุไนโตรเจนในดินต้องทำให้น้ำเสียมีการไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง โดยจากการทดลอง ที่ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่ (ศิลป์ชัย, 2009) โดยศึกษาอัตราการไหลของน้ำ (ค่า HRT) ในระบบพบว่าอัตราการไหลที่ดีที่สุดคือ 20 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน เมื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างโดยรวมด้วยวิธี Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า เมื่อวัดค่าที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกัน อันได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.838 และ 0.457 ( $p < 0.05$ ) ตามลำดับ ส่วนปริมาณแอมโมเนีย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.016 ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ ก-2)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย และไนเตรตในน้ำเข้า และน้ำที่ผ่านคอลัมน์  
ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

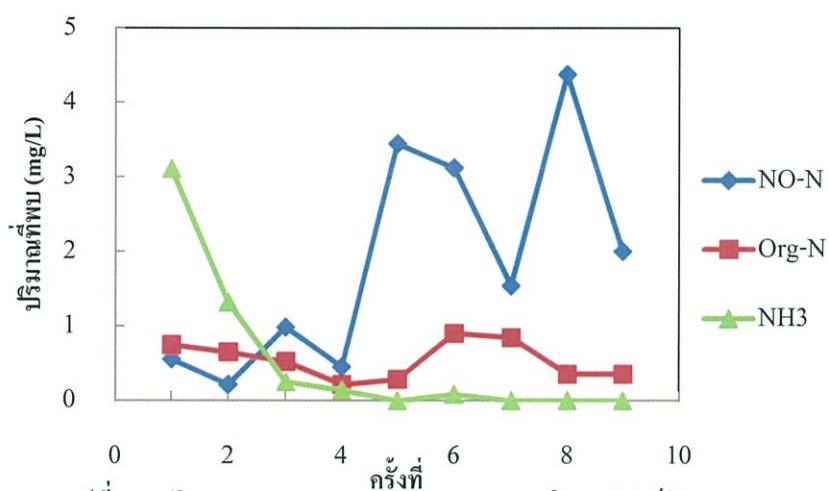
คอลัมน์	น้ำเข้า	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
ปริมาณอินทรีย์ ไนโตรเจน(%เฉลี่ย, S.D.)	2.56±1.46	0.53±0.29	0.57±0.36	0.70±0.79
ปริมาณแอมโมเนีย(NH <sub>3</sub> ) (%เฉลี่ย, S.D.)	1.64±0.69	0.01	1.22±1.29	0.57±0.63
ปริมาณไนเตรต(NO-N) (%เฉลี่ย, S.D.)	0.62±0.84	1.94±1.24	1.85±1.47	2.2±1.67



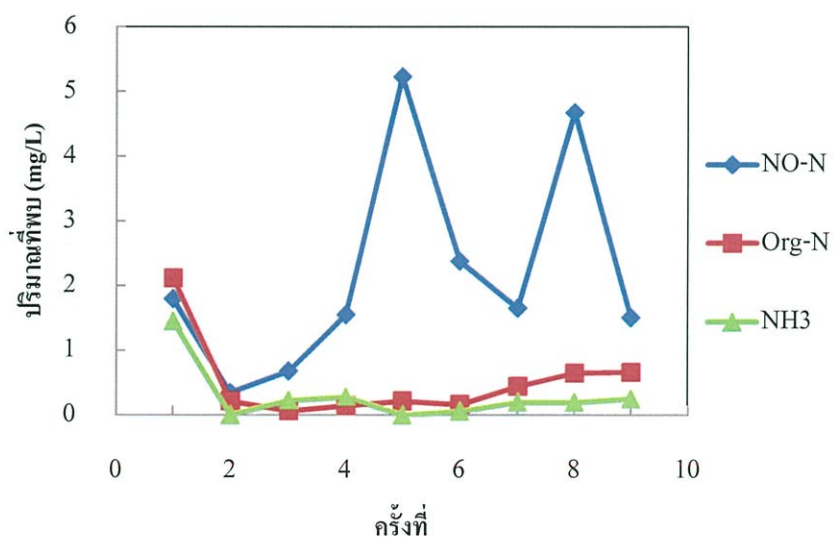
รูปที่ 4.5 ปริมาณ NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N และ Org.-N ในน้ำเข้า



รูปที่ 4.6 ปริมาณ NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N และ Org-N ในคอกลัมน์ทราย



รูปที่ 4.7 ปริมาณ NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N และ Org-N ในคอกลัมน์ดินตะกอน



รูปที่ 4.8 ปริมาณ NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N และ Org-N ในคอกลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยศึกษาการใช้ตะกอนสารส้มซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาใช้บำบัดไอออนฟอสเฟตในน้ำทิ้ง และศึกษาการชะละลายของไอออนอื่นๆ โดยนำน้ำเสียผ่านคอลัมน์ทั้งสาม ได้แก่ คอลัมน์ทราย คอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม เป็นเวลาทั้งหมด 71 วันซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) จะอยู่ที่  $93.06 \pm 13.09$  เปอร์เซ็นต์  $98.45 \pm 2.17$  เปอร์เซ็นต์ และ  $98.69 \pm 1.73$  เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟต (OP) เท่ากับ  $92.44 \pm 13.71$  เปอร์เซ็นต์  $99.86 \pm 0.14$  เปอร์เซ็นต์ และ  $99.85 \pm 0.09$  เปอร์เซ็นต์ สำหรับในคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

2. ปริมาณการชะละลายของไอออนซัลเฟต และคลอไรด์พบว่าในคอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม จะมีปริมาณซัลเฟต และคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น

3. ชนิดหรือรูปของไนโตรเจน (form) ในน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ส่วนมากจะพบอยู่ในรูปไนเตรต

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มระยะเวลาในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถ และจุดอิ่มตัวในการบำบัดของแต่ละคอลัมน์

2. ควรศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆภายในคอลัมน์ เช่น ปริมาณลูมิเนียมนินดินตะกอน เป็นต้น

3. ควรควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าคอลัมน์ให้มีการไหลอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน

4. ศึกษาการดินนำตะกอนสารส้มที่ผ่านน้ำเสียแล้วไปใช้ประโยชน์ในการปลูกพืช

## เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2554. ระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3.  
กรุงเทพฯ : สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ. 5-12 - 5-30.
- กรณีการ์ สิริสิงห. 2549. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ :  
สำนักพิมพ์สารมวลชน. 310-325.
- การประปานครหลวง. 2556. กระบวนการผลิตน้ำประปา. [Online]. Available  
: [http://www.mwa.co.th/main.php?filename=treat\\_water](http://www.mwa.co.th/main.php?filename=treat_water). วันที่สืบค้นข้อมูล : 5 สิงหาคม  
2556.
- ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสกร วิจิตอมรพันธ์ และวรรณะ เรื่องสำเร็จ. 2547. การประยุกต์ใช้ตะกอน  
ดินจากน้ำประปา. กรุงเทพฯ : สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐานกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการ  
เหมืองแร่. 3-8.
- ปริฉัตร คำแท้, ปิยะ เจริญถาวร และพรภักตรา สุขสาคร. 2554. การกำจัดไอออนโครเมียม และสารลด  
แรงตึงผิวประจุลบ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตะกอนสารส้มจากระบบผลิตน้ำประปา.  
โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.  
3-9.
- มันลิน ตันฑุลเวศน์. 2538. วิศวกรรมประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 10-25.
- มันลิน ตันฑุลเวศน์. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย. 187-197.
- ศิลป์ชัย มณีชาติย์, สุขุม ไร่ใจ และอิสริยา วุฒิสินธุ์. 2552. การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำ  
เสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยแมงกานีสซีโอไซด์ในแบบจำลองคลองวนเวียน. วิทยานิพนธ์วิทยา  
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 52-56 .
- สุรณ ธนพิทักษ์. 2545. การกำจัดฟอสเฟตโดยใช้ตะกอนสารส้ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 8-12.
- อุบลวรรณ กมลศิริประเสริฐ. 2536. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบแอร์เร-  
เตทาลูณ โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 8-15.

- American Public Health Association. 2012. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 22<sup>nd</sup>. Washington, DC : American Public Health Association. 4-72 – 4-190.
- A.O. Babatunde, Y.Q. Zhao, R.J. Doyle, S.M. Rackard, J.L.G. Kumar and Y.S. Hu. 2011. “Performance evaluation and prediction for a pilot two-stage on-site constructed wetland system employing dewatered alum sludge as main substrate”. **Bioresource Technology**. 102 : 5645-5652.
- A.O. Babatunde, Y.Q. Zhao, Y. Yang and P. Kearney. 2008. “Reuse of dewatered aluminium-coagulated water treatment residual to immobilize phosphorus : Batch and column trials using a condensed phosphate”. **Chemical Engineering Journal**. 136 : 108-115.
- M. Razali, Y.Q. Zhao and M. Bruen. 2007. “Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution”. **Separation and Purification Technology**. 55 : 300-306.
- Siriporn Larpiattaworn, Nut Pookerdsin, Mathurot Wangchanachai, And Pongsak Noophan. 2013. “Phosphorus Sorption Capacity of Concrete Waste, Natural Sorbents, Alum Residuals from Water Supply Sludge, and Ceramic Material for Tertiary Treatment in Onsite Systems”. **Environment Asia**. 6(1) : 60-65.
- Sisisha D, Mukkanti K and Gandhi N. 2012. “Adsorption Studies on Alum Sludge”. **Pelagia Research Library**. 3(5) : 3362-3366.
- Xu GR, Yan ZC, Wang YC and Wang N. 2009. “Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment”. **Hazard Mater**. 161(2-3) : 663-9.
- Y.Q. Zhao, A.O. Babatunde, Y.S. Hu, J.L.G. Kumar and X.H. Zhao. 2011. “Pilot field-scale demonstration of novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment”. **Process Biochemistry**. 46 : 278-283.
- Y. Yang, Y.Q. Zhao, A.O. Babatunde, L. Wang, Y.X. Ren and Y. Han. 2006. “Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge”. **Separation and Purification Technology**. 51 : 193-200.
- 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

วิธีการวิเคราะห์ดินตะกอน และน้ำเสีย

## ภาคผนวก ก

# วิธีการวิเคราะห์ดินตะกอน และน้ำเสีย

### ก-1 วิธีการวิเคราะห์ดิน

#### ก-1.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

##### 1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter)
2. เครื่องชั่ง
3. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 mL. หรือขนาด 100 mL.
4. แท่งแก้วสำหรับคน
5. กระจกบอกล้น
6. ซ้อนตักสาร
7. กระจกตวง 25 mL.

##### 2. สารเคมี

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

##### 3. วิธีการทดลอง

การวัด pH ในน้ำอัตราส่วนดิน : น้ำ = 1:1 (w/w)

ชั่งดิน 20 กรัมใส่ในบีกเกอร์พลาสติกเติมน้ำกลั่น 20 mL. คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วเป็นระยะให้บ่อยครั้งในระยะ 30 นาทีแรกหลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 30 นาทีจึงวัด pH ของดินในส่วนที่เป็นน้ำใสด้วย pH meter หรือใช้ช้อนตวงตักดินและตวงน้ำแทนการชั่งดินเพื่อวัด pH (1:1, v/v) ก็ได้

##### ข้อเสนอแนะ

1. การวัด pH ของสารละลายดินด้วย pH meter ต้องคำนึงถึงสัดส่วนของดินต่อน้ำการมีเกลือต่างๆละลายอยู่ในสารละลายดิน
2. CO<sub>2</sub> ในอากาศมีผลกระทบต่อ การวัด pH ของดินในน้ำได้เพราะ CO<sub>2</sub> ในอากาศสามารถละลายในน้ำกรณีที่เป็นงานที่ต้องการความถูกต้องมากเป็นพิเศษต้องป้องกันด้วยการปิดบีกเกอร์ที่ใช้ผสมตัวอย่างดินกับน้ำไว้ก่อนการวัด
3. ก่อนวัดค่า pH ของสารละลายดินจะต้องเตรียมเครื่องพีเอชมิเตอร์ ให้พร้อมที่จะทำงานเสียก่อนโดยการวัดสารละลายมาตรฐาน 7.0 และ 4.0 ปรับเครื่องอ่านค่า pH เป็น 7.0 และ 4.0

4. ในกรณีที่ดินเป็นด่างสูงคือมี pH สูงกว่า 7.5 ให้ใช้ Standard buffer solution 7.0 และ 10.0
5. เครื่องพีเอชมิเตอร์ ที่ใช้งานเสร็จแล้วควร Stand by ไว้ไม่ควรปิดเครื่องเลยและ electrode ควรแช่อยู่ในสารละลายตามคำแนะนำของวิธีการใช้ electrode แต่ละยี่ห้อแต่ละรุ่น
6. สารละลายที่ใช้เติมใน electrode ควรซื้อตามคำแนะนำของบริษัทที่ขาย electrode เนื่องจากแต่ละยี่ห้อแต่ละรุ่นใช้สารละลายที่เติมไม่เหมือนกัน

ตารางที่ ก-1 แสดงการแปลความหมายค่า pH ของดินในน้ำ

ระดับ	ช่วง pH water, 1:1
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5 – 4.4
กรดจัดมาก	4.5 – 5.0
กรดจัด	5.1 – 5.5
กรดปานกลาง	5.6 – 6.0
กรดเล็กน้อย	6.1 – 6.5
เป็นกลาง	6.6 – 7.3
ด่างอ่อน	7.4 – 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 – 8.4
ด่างจัด	8.5 – 9.0
ด่างจัดมาก	> 9.0

## ก-2 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 1,500 mL จะได้ตัวอย่างน้ำเสียที่มีปริมาณตะกั่ว 30 mg/L ฟอสเฟต 25 mg/L และมีค่า ซีโอดี 300 mg/L สำหรับใช้ในการทดลอง

## ก-3 วิธีการวิเคราะห์น้ำ

### ก-3.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

#### 1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter)
2. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 ml หรือขนาด 100 ml
3. กระจกบอกลึคน้ำ

#### 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 จะกำหนดสารละลายบัฟเฟอร์ไว้คือพีเอช 4.0 และ 7.0 ในขณะที่เครื่องวัดพีเอชบางยี่ห้อเช่น DENVER สามารถเลือกสารละลายบัฟเฟอร์ที่ต้องการ ทำได้โดยเทสารละลายลงบีกเกอร์ จุ่มหัววัดลงไป ในสารละลาย แล้วทำตามขั้นตอนที่แนะนำสำหรับเครื่องวัดพีเอชแต่ละยี่ห้อ ขณะ Calibrate ควรแกว่งหัววัดเบาๆ
3. ล้างหัววัดด้วยน้ำกลั่น และซับให้แห้งก่อนวัดพีเอชทุกครั้ง
4. เทตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดลงบีกเกอร์ แล้วทำการวัด โดยแกว่งหัววัดเบาๆ
5. เมื่อค่าพีเอชหยุดนิ่งประมาณ 10 วินาที อ่านค่าที่วัดได้
6. ทำความสะอาดหัววัดแล้วเก็บให้เรียบร้อย

### ก-3.2 การวิเคราะห์ไอออนฟอสเฟต (Phosphate)

(กรณีการ สิริสิงห. 2549: 317)

การวิเคราะห์หาฟอสฟอรัสแบ่งได้เป็น 2 ตอนคือ

1. เปลี่ยนฟอสฟอรัสในรูปที่สนใจจะหาให้ไปอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำได้
2. การหาค่าออร์โธฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำด้วยวิธี colorimetric

วิธี Vanadomolybdo phosphoric acid colorimetric method ใช้สำหรับวิเคราะห์น้ำเสียที่ฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธี Ascorbic acid method ใช้สำหรับวิเคราะห์น้ำเสียที่ฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.01-6mg/L

#### Sulfuric acid-nitric acid digestion

##### 1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. Digestion rack มีที่ให้ความร้อนและดูดควันออก
2. Micro-kjeldahl flasks

##### 2. สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
2. กรดไนตริกเข้มข้น
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ในน้ำ
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล

##### 3. วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างมา 20 mL ใส่ใน Micro-kjeldahl flasks เติม Conc.  $H_2SO_4$  1 mL และ conc.  $HNO_3$  5 mL
2. ย่อยตัวอย่างจนได้ปริมาตร 1 mL แล้วย่อยต่อจนกระทั่งได้สารละลายที่ไม่มีสีเพื่อไล่  $HNO_3$
3. ทำให้เย็น เติมน้ำกลั่นประมาณ 20 mL และฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ค่อยๆเติม NaOH 1 N จนได้สีชมพูอ่อน เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 mL

## วิธี Ascorbic acid method

### 1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) พร้อมด้วย infrared phototube สำหรับใช้ที่ 880 nm โดยใช้ light path 0.5 เซนติเมตร หรือยาวกว่านี้

### 2. สารเคมี

#### 1. สารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล

เติม conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  70 mL ลงในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 mL

#### 2. แอนติโมนิโปแทสเซียมทาเทรต

ละลาย 1.3715 กรัม  $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  ในน้ำกลั่น 200 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 mL เก็บในขวด

#### 3. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต

ละลาย 20 กรัม  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ในน้ำกลั่น 500 mL เก็บในขวดพลาสติกที่  $4^\circ\text{C}$

#### 4. แอสคอร์บิกเอซิด 0.1 โมลาร์

ละลาย 1.76 กรัม แอสคอร์บิกเอซิดในน้ำกลั่น 100 mL สารละลายนี้จะอยู่ตัวประมาณ 1 สัปดาห์ ถ้าเก็บไว้ที่  $4^\circ\text{C}$

#### 5. น้ำยารวม

ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 mL น้ำยารวม ดังนี้ 50 mL 5 นอร์มอล  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5 mL สารละลายแอนติโมนิโปแทสเซียมทาเทรต 15 mL สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต และ 30 mL กรดแอสคอร์บิก ตั้งน้ำยาเหล่านี้ทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องจึงจะผสมกัน ถ้ามีความขุ่นเกิดขึ้นในน้ำยารวมหลังจากเติมแอนติโมนิโปแทสเซียมทาเทรตหรือแอมโมเนียมโมลิบเดต ให้เขย่าน้ำยาเคมีรวมนี้แล้วตั้งทิ้งไว้ 2-3 นาที จนกระทั่งความขุ่นหายไป จึงจะเติมน้ำยาเคมีอื่นต่อไป น้ำยารวมนี้อยู่ตัวได้ 4 ชั่วโมง

#### 6. สารละลายสต็อกฟอสเฟต

ละลาย 219.5 mg ของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ (anhydrous) เติมน้ำกลั่นจนครบ 1000 mL 1 mL ของสารละลายนี้ = 50.0  $\mu\text{g PO}_4\text{-P}$

#### 7. สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

นำสารละลายสต็อกมา 50.0 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL 1 mL = 2.5  $\mu\text{g PO}_4\text{-P}$

### 3. วิธีการทดลอง

1. เตรียมกราฟมาตรฐาน เตรียมอนุกรมของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 2, 6, 10, 16 และ 24 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดที่กำหนด เขย่าให้เข้ากัน จะได้อนุกรมของฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0, 5, 15, 25, 40 และ 60  $\mu\text{g}$  หรือ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.2  $\mu\text{g/mL}$  ตามลำดับ

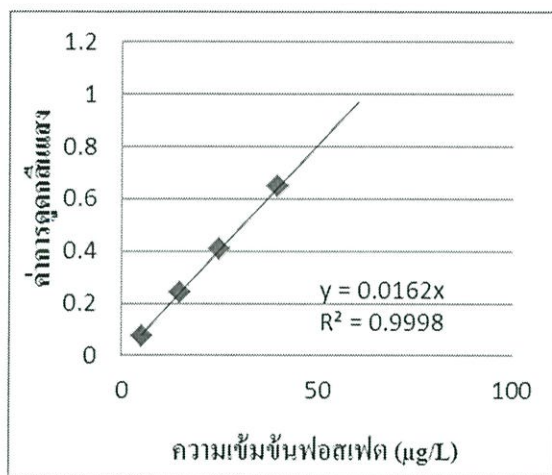
2. การเตรียมตัวอย่าง ปิเปตตัวอย่าง 50.0 mL ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 125 mL เติมนีลล์ฟทาลีน 1 หยด ถ้าได้สีแดงให้หยด 5 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ลงไปที่ละหยดจนกระทั่งสีแดงหายไป เติมน้ำยารวม 8.0 mL เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที เพื่อให้เกิดสี แล้วอ่านค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 nm

3. การทำ correction สำหรับสีหรือความขุ่น สีของน้ำธรรมชาติไม่ขัดขวางการหาที่ wavelength สูง ในกรณีที่น้ำขุ่นหรือมีสีมาก ให้ทำแบลลค์ โดยเติมน้ำยาเคมีทุกอย่าง ยกเว้น แอสคอร์บิกเอซิด และแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต ลงในตัวอย่าง หักค่าแอมซอร์บแนนซ์ของแบลลค์จากค่าแอมซอร์บแนนซ์ของตัวอย่างทุกอัน

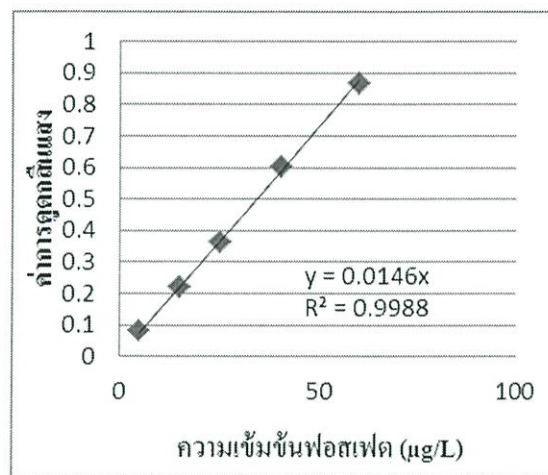
### 4. วิธีการคำนวณ

$$\text{ฟอสเฟต (mg/L)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (\mu g)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

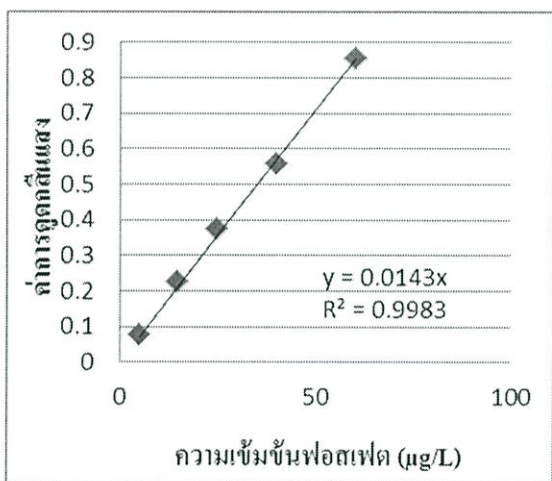
### 5. กราฟมาตรฐานฟอสเฟต



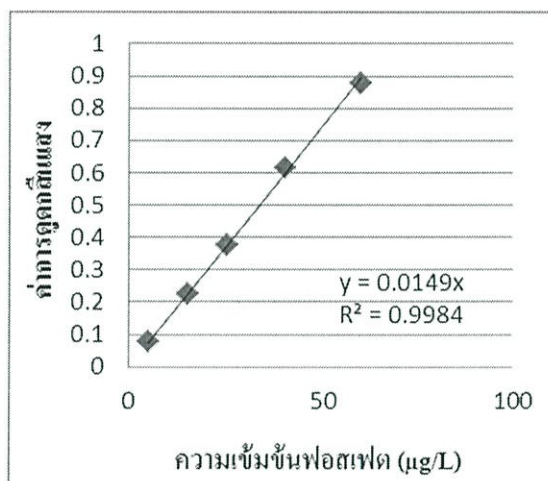
ครั้งที่ 1



ครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3



ครั้งที่ 4

รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

### ก-3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

(กรรมวิธีการ สิริสิงห. 2544 : 263)

#### ก-3.3.1 การวิเคราะห์แอมโมเนียม

##### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL
2. ชุคเครื่องกลั่น
3. ขวดเจดาคัทล์
4. ปิเปต
5. ชุคไทเทรต

##### 2. สารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์
2. สารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์ (Indicating boric acid solution)

ละลายบอริก  $H_3BO_3$  20 กรัม ในน้ำกลั่นเติม Mixed indicator 10 mL เจือจางให้เป็น 1 L

3. 0.02 N  $H_2SO_4$

##### 3. วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างมา 250 mL ใส่ขวดเจดาคัทล์ ที่มีหินหรือลูกแก้วอยู่
2. เติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ 25 mL
3. นำกรดบอริกมาเติมในขวดรูปชมพู่ 50 mL
4. นำไปกลั่นในเครื่องเจดาคัทล์ รอจนสารละลายกรดบอริกมีปริมาตร 200 mL
5. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มา ไทเทรตด้วย 0.02 N  $H_2SO_4$  สังเกตจุดยุติที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วง
6. ทำ Blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและ วิเคราะห์เหมือนกับตัวอย่างทุกขั้นตอน

## 4. วิธีการคำนวณ

$$NH_3 = \frac{(A \times B) \times 280}{V(ml)}$$

เมื่อ A = ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (mL)

B = ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้กับแบลงค์ (mL)

V = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)

## ก-3.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณที่เคเอ็น

## 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องย่อย
2. ชุดเครื่องกลั่น
3. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
4. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL
5. ปีเปต
6. ชุดไทเทรต

## 2. สารเคมี

1. อินดิเคเตอร์ผสม
2. สารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์ (Indicating boric acid solution)

ละลายบอริก  $H_3BO_3$  20 กรัม ในน้ำกลั่นเติมอินดิเคเตอร์ผสม 10 มล. เจือจางให้เป็น 1 L

3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
4. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล

ชั่ง  $Na_2CO_3$  0.25 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 mL แล้วนำสารละลาย  $Na_2CO_3$  มา 10 mL เจือจางให้เป็น 200 mL จากนั้นเติมสารละลายกรดบอริก จำนวน 50 mL แล้วนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.02 N

5. โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ )
6. สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ )

ชั่งสาร  $CuSO_4$  จำนวน 25.115 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เป็น 1 L

7. โซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไธโอซัลเฟต รีเอเจนต์ ( $NaOH-Na_2S_2O_3$ )

### 3. วิธีการทดลอง

1. ใส่หินปูนลงในขวดใส่ขวดเจดาคัท ขนาด 800 mL แล้วเติมสาร  $K_2SO_4$  6.7 กรัม
2. การเลือกตัวอย่างน้ำ (ขึ้นกับปริมาณอินทรีย์ในโตรเจนที่คาดว่าจะมีเจือปนในน้ำเสีย)

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูล ปริมาณอินทรีย์ในโตรเจนและขนาดตัวอย่างน้ำ

Organic-N ในน้ำเสีย (mg/L)	ขนาดตัวอย่างน้ำ (mL)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50.0
50-100	25.0

3. กรณีใช้น้ำกลั่น 25-50 mL ให้เติมน้ำกลั่น 100 mL
4. เติมสารละลาย  $CuSO_4$  6.7 mL และ Conc.  $H_2SO_4$  6.7 mL เขย่าขวดเจดาคัท
5. การย่อยสลาย (Digestion) นำไปต้มให้เหลือปริมาตรประมาณ 10-20 mL ที่งไวให้เย็น
6. เติมน้ำกลั่น 300 mL และ เติมสารละลาย  $NaOH-Na_2S_2O_3$  จำนวน 50 mL จากนั้นนำไปต่อกับเครื่องกลั่น
7. การกลั่น (Distillation) นำขวดเจดาคัท ไปประกอบกับชุดกลั่น ทำการกลั่นโดยเก็บน้ำส่วนที่กลั่นได้อย่างน้อย 200 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ที่มีสารละลายกรดบอริกอยู่ 50 mL โดยให้ปลายของแท่งแก้วจุ่มลงในสารละลายกรดบอริก
8. การไทเทรต (Titration) นำส่วนที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.02 N เมื่อถึงจุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นม่วงอ่อน
9. ให้ทำแบงค์ โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและ วิเคราะห์เหมือนกับตัวอย่างทุกขั้นตอน

#### 4. วิธีการคำนวณ

หา normality ของ  $H_2SO_4$

$$H_2SO_4(N) = \frac{A \times B}{53 \times ml \ H_2SO_4}$$

เมื่อ A = น้ำหนักหน่วยป็นกรัมของ  $Na_2CO_3$  ใน 1 ลิตร

B = มล. ของ  $Na_2CO_3$  ที่ใช้

หาทีเคเอ็น

$$TKN = \frac{(A \times B) \times 280}{V(ml)}$$

เมื่อ A = ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้กับแบลงค์ (มิลลิลิตร)

V = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

### ก-3.3.3 การวิเคราะห์ไนเตรต

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
2. ปิเปต
3. หลอดทดลอง
4. ตะแกรงสำหรับใส่หลอดทดลอง (Test Tube Rack)
5. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

#### 2. สารเคมี

1. สารละลายสต็อกไนเตรต

ละลาย anhydrous  $\text{KNO}_3$  721.8 มิลลิกรัม เติมน้ำกลั่นจนเป็น 1 L สารละลายนี้มีความเข้มข้น 100 mgN/L

2. สารละลายมาตรฐานไนเตรต

นำสารละลายสต็อกไนเตรตมา 10 mL เติมน้ำกลั่นเป็น 1 L

3. สารละลายโซเดียมอาร์ซีไนต์

ละลาย  $\text{NaAsO}_2$  5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 L

4. สารละลายบลูซึน-ซัลฟานิลิก

5. กรดซัลฟิวริก

6. สารละลายโซเดียมคลอไรด์

#### 3. วิธีการทดลอง

1. การทำกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรตในช่วง 0.1-1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร โดยการเจือจาง 2, 4, 5, 8 และ 9 mL ของสารละลายมาตรฐานไนเตรตด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 10 mL จะได้สารละลายมาตรฐานไนเตรตที่มีความเข้มข้น 2, 4, 5, 8 และ 9 ไมโครกรัมไนโตรเจน

2. การเตรียมตัวอย่าง

ถ้าตัวอย่างมีคลอรีนตกค้าง ให้เติมโซเดียมอาร์ซีไนต์ 1 หยดต่อ 0.1 มิลลิกรัมคลอรีนผสมให้เข้ากัน

3. การทำให้เกิดสี

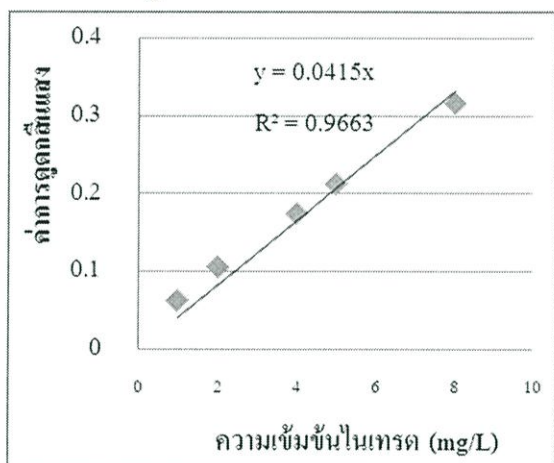
ปิเปตตัวอย่าง 10 mL หรือน้อยกว่า แล้วเติมน้ำให้ครบ 10 mL ใส่หลอดทดลองซึ่งวางอยู่ใน ตะแกรงแล้วนำตะแกรงไปวางในน้ำเย็น เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 mL เขย่าให้เข้ากัน เติมกรดซัลฟิวริก 10 mL เขย่าอีกครั้ง ปล่อยให้วางไว้ให้เย็น เติมสารละลายบลูซึนซัลฟานิลิก 0.5 mL เขย่าให้เข้ากัน นำตะแกรงวางในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิให้

อยู่ที่ 95°C ทิ้งไว้ 20 นาที นำตะแกรงมาใส่ในอ่างน้ำเย็น ปล่อยให้ถึงไว้จนเท่าอุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร

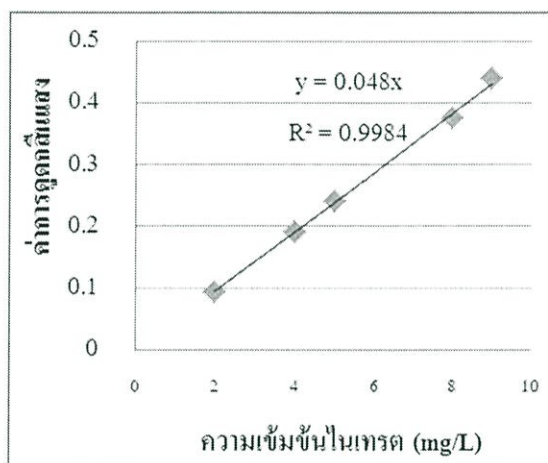
#### 4. วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณไนเตรต (mg/l)} = \frac{\text{ค่าไนเตรตที่อ่านได้จากกราฟ (\mu\text{g})}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ (ml)}}$$

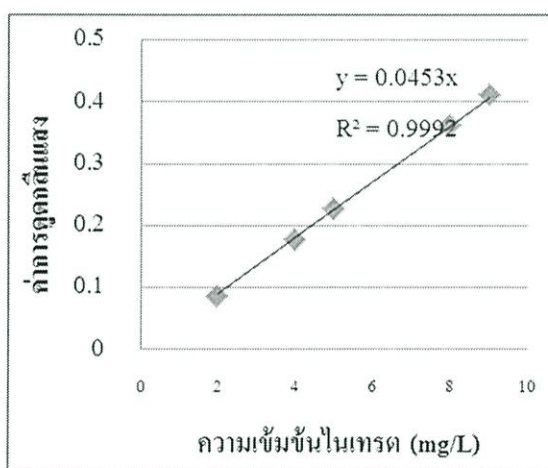
#### 5. กราฟมาตรฐานไนเตรต



ครั้งที่ 1



ครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3

รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนเตรต ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

### ก-3.4 การวิเคราะห์หาซัลเฟต

(กรรมวิธีการ สิริสิงห. 2544 : 231)

วิธี Turbidimetric Method

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องปั่นกวน
2. แท่งแม่เหล็ก
3. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. ซ้อนตักสาร
5. ปิเปต 10 mL.
6. ขวดรูปชมพู่ 250 mL.

#### 2. สารเคมี

##### 1. สารละลายบัฟเฟอร์

ละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) 30 กรัม โซเดียมอะซิเตต ( $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ ) 5 กรัม โพแทสเซียมไนเตรท ( $KNO_3$ ) 1 กรัม และกรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) 20 mL ในน้ำกลั่น 500 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 mL

##### 2. ผลึกแบเรียมคลอไรด์

##### 3. สารละลายมาตรฐานซัลเฟต

#### 3. วิธีการทดลอง

##### 1. การทำกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 mg/L ใส่ขวดรูปชมพู่เติมน้ำกลั่น จนได้ปริมาตรเป็น 100 mL เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 20 mL และทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน ค่อยๆเติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ 1 ซ้อน ปั่นกวนต่ออีก 1 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 nm.

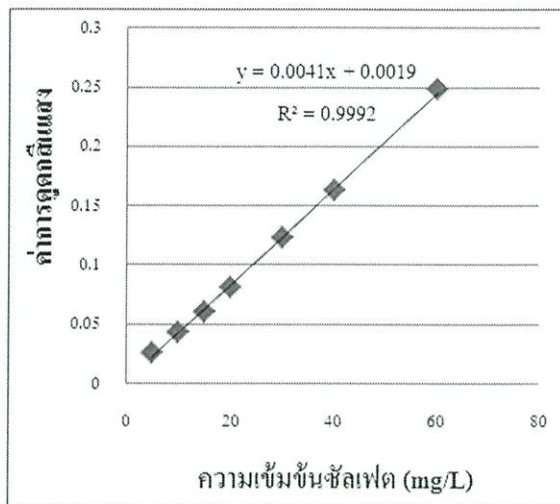
##### 2. การทำน้ำตัวอย่าง

นำน้ำตัวอย่างมา 100 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 20 mL และทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน ค่อยๆเติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ 1 ซ้อน ปั่นกวนต่ออีก 1 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 nm.

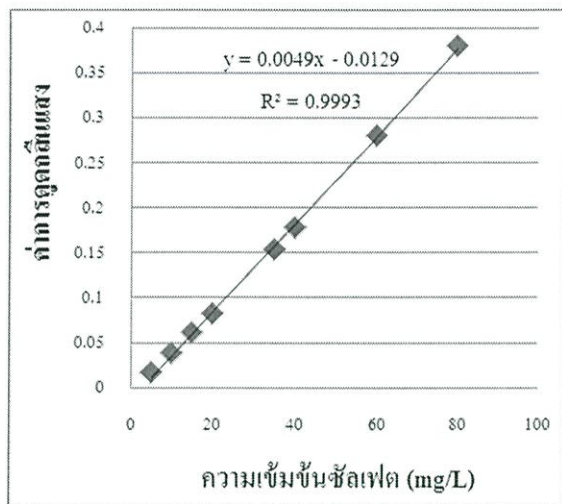
## 4. วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณซัลเฟต (mg/l)} = \frac{\text{ค่าซัลเฟตที่วัดได้ (mg) x 1000}}{\text{ml sample}}$$

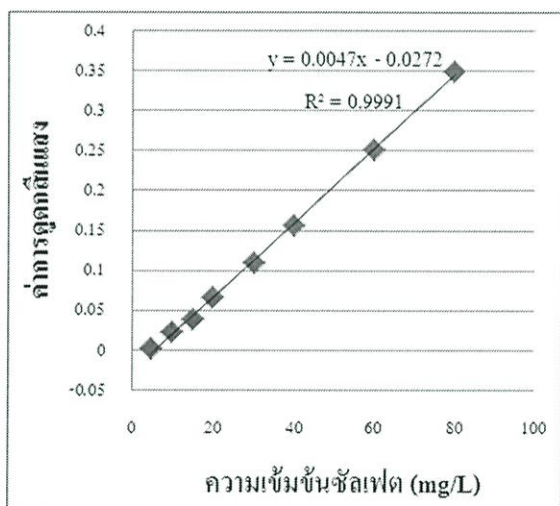
## 5. กราฟมาตรฐาน



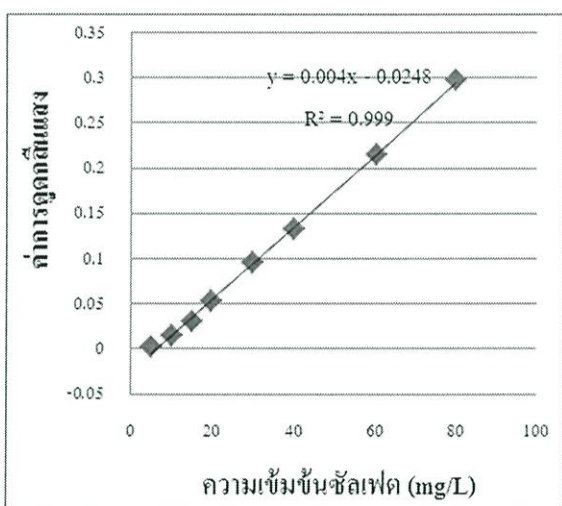
ครั้งที่ 1



ครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3



ครั้งที่ 4

### ก-3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

(กรรมวิธีการ สิริสิงห. 2544 : 263)

#### ก-3.3.1 การวิเคราะห์แอมโมเนียม

##### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250mL
2. ชุดเครื่องกลั่น
3. ขวดเจคาห์ล
4. ปิเปต
5. ชุดไทเทรต

##### 2. สารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์
2. สารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์ (Indicating boric acid solution)  
ละลายบอริก  $H_3BO_3$  20 กรัม ในน้ำกลั่นเติม Mixed indicator 10 mL เจือจางให้

เป็น 1 L

3. 0.02 N  $H_2SO_4$

##### 3. วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างมา 250 mL ใส่ขวดเจคาห์ล ที่มีหินหรือลูกแก้วอยู่
2. เติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ 25 mL
3. นำกรดบอริกมาเติมในขวดรูปชมพู่ 50 mL
4. นำไปกลั่นในเครื่องเจคาล์ รอนสารละลายกรดบอริกมีปริมาตร 200 mL
5. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มาไทเทรตด้วย 0.02 N  $H_2SO_4$  สังเกตจุดยุติที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วง
6. ทำ Blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและ วิเคราะห์เหมือนกับตัวอย่างทุกขั้นตอน

ภาคผนวก ข  
ผลการทดลอง

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตาราง ข.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่นำมาใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์(mg/L) \ ครั้งที่	1	2	3	4
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	1.04	0.91	1.37	1.76
ปริมาณออร์โธฟอสเฟต(OP)	0.19	0.23	0.71	1.03
ปริมาณซิลิเกต	86.60	33.75	94.30	90.08
ปริมาณคลอไรด์	1.81	0.63	1.96	1.21
ปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจน	0.05	1.31	1.50	0.30
ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน	0.53	-0.20	2.83	1.04
ปริมาณแอมโมเนีย	4.93	0.62	1.51	6.38

ตาราง ข.2 ค่าพีเอช (pH) ของดิน

อัตราส่วน ดิน : น้ำ	1 : 1		1 : 5		เฉลี่ย	N
	1	2	1	2		
ทราย	6.6	6.73	6.64	6.68	6.66	4
ดินตะกอน 1	6.26	6.15	6.00	6.00	6.15	8
ดินตะกอน 2	6.23	6.25	6.12	6.15		
ดินตะกอนผสมสารส้ม1	6.33	6.34	6.15	6.2	6.23	8
ดินตะกอนผสมสารส้ม2	6.31	6.3	6.07	6.1		

ตาราง ข.3 ค่าพีเอชของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ลำดับที่	ค่าพีเอช ก่อนผ่านคอลัมน์	ค่าพีเอชหลังผ่านคอลัมน์									
		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	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,S.D	6.47 ± 1.24	7.22 ± 0.19		7.27 ± 0.40				7.40 ± 0.48			
N	10	20		40				40			

ตาราง ข.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด และอโรฟอสเฟตของทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มในการทดลองแบบแบตช์

ครั้งที่	ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)						ปริมาณอโรฟอสเฟตทั้งหมดหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)					
	ทราย		ดินตะกอน		ดินตะกอนผสมสารส้ม		ทราย		ดินตะกอน		ดินตะกอนผสมสารส้ม	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	34.88	34.50	86.87	86.77	80.13	80.18	23.52	23.08	83.71	83.46	79.41	79.38
2	28.81	28.42	88.58	88.58	79.79	79.79	22.30	22.12	86.26	86.07	79.92	79.73
3	27.52	27.39	83.10	82.97	83.72	83.75	20.37	20.28	83.95	83.65	81.15	81.20
เฉลี่ย,S.D	30.25±3.48		86.15±2.53		81.23±1.95		21.94±1.36		84.52±1.29		80.13±0.83	
N	6		6		6		6		6		6	

ตาราง ข.5 ปริมาณอโรพอสเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สถานีที่	ปริมาณอโรพอสเฟตก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณอโรพอสเฟตหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	2.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
3	6.26	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
4	8.33	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	*	*	0.01	0.01
5	13.22	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	12.12	0.21	0.24	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
7	15.77	0.14	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
8	11.56	1.29	1.29	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
9	14.20	1.49	1.48	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00
10	13.43	5.65	5.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.03
เฉลี่ย,S.D	10.77±4.40	0.99±1.79		0.01±0.01				0.01±0.01			
N	9	18		36				34			

\*ผลการทดลอง error

ตารางที่ ข.6 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สัปดาห์ที่	ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	2.04	0.04	0.06	0.08	0.09	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05
3	6.39	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.07	0.04	0.06
4	8.79	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.10
5	13.47	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02
6	18.81	0.39	0.38	0.28	0.28	0.31	0.32	0.35	0.36	0.27	0.29
7	26.72	0.21	0.22	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
8	14.25	1.78	1.80	0.67	0.68	1.14	1.16	0.60	0.61	0.93	0.94
9	18.66	1.49	1.53	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
10	14.93	6.06	6.22	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05
เฉลี่ย,S.D	13.78±7.38	1.14±1.93		0.17±0.29				0.15±0.25			
N	9	18		36				36			

ตารางที่ ข.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดไอออนฟอสเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ลำดับที่	ประสิทธิภาพการบำบัดอโธฟอสเฟต (%)			ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด(%)		
	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม	ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
2	99.22	99.53	99.71	98.58	96.24	97.70
3	99.64	99.85	99.86	99.45	99.18	99.15
4	99.78	99.79	99.82	99.27	99.05	98.90
5	99.85	99.95	99.94	99.89	99.92	99.89
6	98.16	99.92	99.90	97.96	98.43	98.31
7	99.08	99.98	99.96	99.19	99.91	99.90
8	88.84	99.82	99.80	90.71	93.59	94.59
9	89.56	99.94	99.93	93.62	99.93	99.93
10	57.82	99.98	99.76	58.88	99.84	99.86
เฉลี่ย,S.D.	92.44±13.71	99.86±0.14	99.85±0.09	93.06±13.09	98.45±2.17	98.69±1.73
N	9	9	9	9	9	9

ตาราง ข.8 ปริมาณคลอไรด์ของคอถัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สัปดาห์ที่	ปริมาณคลอไรด์ ก่อนผ่านคอถัมน์ (mg/L)	ปริมาณคลอไรด์หลังผ่านคอถัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	77.92	86.85	86.85	372.23	372.23	292.82	277.93	436.74	421.86	272.97	268.00
3	83.63	97.27	99.26	238.22	228.30	213.41	208.45	173.71	168.74	193.56	183.63
4	81.64	116.63	115.14	183.63	188.59	178.67	193.56	*	*	173.71	198.52
5	34.24	74.94	76.43	143.93	148.89	161.30	168.74	193.56	193.56	186.11	198.52
6	38.96	44.17	41.19	178.67	178.67	198.52	173.71	203.48	228.30	208.45	228.30
7	92.81	58.56	57.07	148.89	163.78	138.96	134.00	153.85	158.82	134.00	148.89
8	98.76	98.27	99.76	173.71	173.71	193.56	198.52	168.74	188.59	178.67	173.71
9	85.12	92.81	92.81	173.71	168.74	148.89	163.78	168.74	178.67	178.67	178.67
10	89.83	89.33	88.34	178.67	183.63	163.78	178.67	183.63	163.78	198.52	173.71
เฉลี่ย,S.D	75.88±23.14	84.21±21.75		194.04±55.42				201.80±64.53			
N	9	18		36				34			

\* ไม่มีผลการทดลอง

ตาราง ข.9 ปริมาณซัลเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สถานีที่	ปริมาณซัลเฟต ก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณซัลเฟตหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1.71	1.80	1.75	3.98	3.69	4.25	4.32	4.44	4.54	4.71	4.64
3	1.04	1.91	1.71	4.71	4.66	4.76	4.90	4.32	4.22	4.93	4.93
4	3.22	2.76	2.82	3.37	4.10	2.64	2.64	*	*	3.61	3.12
5	1.04	1.55	1.55	2.15	2.23	1.71	1.83	2.49	2.60	2.22	2.89
6	1.08	0.57	0.58	2.19	2.33	2.29	2.45	2.80	2.94	2.38	2.53
7	2.36	1.29	1.31	3.04	3.08	3.24	3.27	3.50	3.64	3.08	3.11
8	2.35	2.14	2.13	2.87	2.89	3.29	3.44	2.90	2.91	3.36	3.34
9	1.42	2.09	2.08	3.18	3.17	3.26	3.24	3.39	3.40	2.89	2.93
10	2.30	1.53	1.52	2.50	2.52	3.32	3.45	2.69	2.81	2.78	2.88
เฉลี่ย,S.D	1.83±0.77	1.73±0.61		3.19±0.83				3.35±0.76			
N	9	18		36				34			

\* ไม่มีผลการทดลอง

ตาราง ข.10 ปริมาณไนเตรด-ไนโตรเจนของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สถานีที่	ปริมาณไนเตรด-ไนโตรเจนก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณไนเตรด-ไนโตรเจนหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	0.13	1.16	1.26	0.76	0.60	0.50	0.36	1.77	1.94	1.84	1.65
3	0.05	3.37	3.56	0.14	0.24	0.25	0.24	0.33	0.29	0.35	0.42
4	0.18	1.53	1.53	0.82	0.81	1.13	1.18	*	*	0.70	0.67
5	0.58	2.18	2.18	0.30	0.32	0.60	0.60	0.79	0.78	2.32	2.33
6	0.20	0.56	0.56	3.16	3.19	3.71	3.71	4.74	4.75	5.66	5.76
7	0.19	0.48	0.43	4.76	4.65	1.55	1.52	2.26	2.27	2.43	2.56
8	0.11	1.89	1.89	2.06	2.03	1.04	1.04	1.52	1.63	1.78	1.69
9	2.24	4.18	4.19	4.59	4.61	4.14	4.15	4.75	4.74	4.60	4.61
10	1.89	1.97	1.97	2.04	2.05	1.95	1.95	1.94	1.95	1.04	1.11
เฉลี่ย,S.D	0.62±0.84	1.94±1.24		1.85±1.47				2.20±1.67			
N	9	18		36				34			

\* ไม่มีผลการทดลอง

ตาราง ข.11 ปริมาณแอมโมเนียของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สถานีที่	ปริมาณแอมโมเนีย ก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณแอมโมเนียหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	2.18	-	-	3.58	2.80	3.02	3.02	1.79	1.79	1.12	1.12
3	1.68	-	-	0.56	0.45	2.02	2.24	-	-	-	-
4	1.40	-	-	-	-	0.56	0.45	*	*	0.22	0.22
5	0.50	-	-	0.11	0.11	0.22	0.11	0.22	0.22	0.34	0.34
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0.95	0.11	0.11	0.11	0.22	-	-	0.11	0.11	-	-
8	1.57	-	-	-	-	-	-	0.11	0.22	0.22	0.22
9	2.18	-	-	-	-	-	-	0.22	0.22	0.11	0.22
10	2.63	-	-	-	-	-	-	0.11	0.11	0.34	0.45
เฉลี่ย,S.D	1.64±0.69	0.01		1.22±1.29				0.57±0.63			
N	9	2		16				24			

\* ไม่มีผลการทดลอง

- ค่ากว่าขีดจำกัดที่เครื่องมือสามารถวัดได้

ตาราง ข.12 ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนของคอลลิม์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

สัปดาห์ที่	ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนก่อนผ่านคอลลิม์ (mg/L)	ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนหลังผ่านคอลลิม์ (mg/L)									
		ทราย		ดินตะกอน1		ดินตะกอน2		ดินตะกอนผสมสารส้ม1		ดินตะกอนผสมสารส้ม2	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1.88	0.56	0.28	0.62	1.12	0.90	0.34	1.01	1.57	3.08	2.80
3	0.56	-	-	0.28	0.11	1.34	0.84	0.28	0.56	-	-
4	2.38	0.28	0.56	0.56	0.56	0.28	0.67	*	*	0.06	0.06
5	-	0.28	0.28	0.17	0.17	0.34	0.17	0.06	0.06	0.22	0.22
6	1.40	0.84	0.56	-	-	0.56	0.56	-	-	0.56	0.28
7	2.13	0.45	0.73	1.01	1.18	0.56	0.84	0.17	0.45	-	-
8	2.77	1.12	1.12	1.12	1.40	0.56	0.28	0.17	0.34	0.34	0.90
9	4.82	0.28	0.28	0.56	0.28	0.28	0.28	0.34	0.62	1.01	0.62
10	4.51	0.56	0.28	0.28	0.56	0.28	0.28	0.45	0.45	0.78	0.95
เฉลี่ย,S.D	2.56±1.46	0.53±0.29		0.57±0.36				0.70±0.79			
N	8	16		34				28			

\* ไม่มีผลการทดลอง

- ต่ำกว่าขีดจำกัดที่เครื่องมือสามารถวัดได้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

## ภาคผนวก ค

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ค-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนซัลเฟต และคลอไรด์

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

$H_0$ : ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนซัลเฟต คลอไรด์ ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีการแจกแจงปกติ

$H_1$ : ข้อมูลประสิทธิภาพบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนซัลเฟต คลอไรด์ ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีการแจกแจงไม่ปกติ

ตาราง ค-1 ทดสอบการแจกแจงปกติ

## Tests of Normality

Columns		Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.
TP	ทราย	.572	9	.000
	ดินตะกอน	.785	9	.014
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.864	9	.106
OP	ทราย	.614	9	.000
	ดินตะกอน	.829	9	.044
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.484	9	.000
Cl	ทราย	.942	9	.598
	ดินตะกอน	.746	9	.005
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.658	9	.000
Sulphate	ทราย	.970	9	.892
	ดินตะกอน	.927	9	.452
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.839	9	.056
NH <sub>3</sub> -N	ทราย	.390	9	.000
	ดินตะกอน	.651	9	.000
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.605	9	.000
Org-N	ทราย	.929	9	.470
	ดินตะกอน	.923	9	.417
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.687	9	.001
NO <sub>3</sub> -N	ทราย	.926	9	.445
	ดินตะกอน	.891	9	.205
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	.914	9	.347

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

จากการทดสอบพบว่าค่า p-value ของประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต การชะละลายของ ไอออนคลอไรด์ ปริมาณแอมโมเนีย อินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงไม่ปกติ

ส่วนการชะละลายของไอออนซัลเฟต ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสม สารส้ม มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$  แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

### ค-1.2 ประชากรทุกกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบจะต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน (homogeneity of variance)

$H_0$ : ความแปรปรวนของประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของ ไอออนซัลเฟต คลอไรด์ ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : ความแปรปรวนของประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลาย ของไอออนซัลเฟต คลอไรด์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน  
ตาราง ค-2ทดสอบความแปรปรวน

Test of Homogeneity of Variances

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
TP	3.950	2	24	.033
OP	7.827	2	24	.002
Cl	.944	2	24	.403
Sulphate	.158	2	24	.855
NH <sub>3</sub> -N	5.616	2	24	.010
Org-N	1.311	2	24	.288
NO <sub>3</sub> -N	.476	2	24	.627

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า p-value ของประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต ของคอลัมน์ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$  แสดงว่าประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต ในคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสม สารส้ม แตกต่างกัน

ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดและการชะละลายไอออนซัลเฟต คลอไรด์ ปริมาณแอมโมเนีย อินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และ

ดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$  แสดงว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน

ดังนั้น จากข้อตกลงเบื้องต้นของการใช้สถิติ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต การชะละลายไอออนคลอไรด์ ปริมาณแอมโมเนีย อินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนไม่ผ่านข้อตกลงเบื้องต้น ทำให้ไม่สามารถใช้ One-way ANOVA ได้ จึงเลือกใช้สถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance และหากพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ จะมีการทดสอบว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน โดยจะใช้การทดสอบ Mann-Whitney Test ส่วนการชะละลายไอออนซัลเฟตผ่านข้อตกลงเบื้องต้น ทำให้สามารถใช้ One-way ANOVA ได้

### ค-1.3 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟต

$H_0$ : ประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : ประสิทธิภาพการบำบัดไอออนฟอสเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)  $p$ -value = 0.366 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$  แสดงว่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 และประสิทธิภาพการบำบัดอโรฟอสเฟต(OP)  $p$ -value = 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่าประสิทธิภาพการบำบัดอโรฟอสเฟต(OP) ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

#### ค-1.4 ทดสอบความแตกต่างของการชะละลายไอออนคลอไรด์ของคอลลัมน์ทราย ดิน ตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

$H_0$ : การชะละลายไอออนคลอไรด์ของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : การชะละลายไอออนคลอไรด์ของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่าค่า  $p$ -value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่าปริมาณการชะละลายไอออนคลอไรด์ของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

#### ค-1.5 ทดสอบความแตกต่างการชะละลายไอออนซัลเฟตของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

$H_0$ : การชะละลายไอออนซัลเฟตของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : การชะละลายไอออนซัลเฟตของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่าค่า Kruskal Wallis One-way analysis of Variance  $p$ -value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่าการชะละลายไอออนซัลเฟตของคอลลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

จากการพิจารณาคู่ที่แตกต่างด้วยสถิติ Maan-Whitney U Test พบว่า คอลลัมน์ทราย กับดินตะกอน  $p$ -value = 0.000 และคอลลัมน์ทราย กับดินตะกอนผสมสารส้ม  $p$ -value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนคอลลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม  $p$ -value = 0.796 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

### ค-1.6 ทดสอบความแตกต่างปริมาณของแอมโมเนีย อินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

$H_0$ : ปริมาณของแอมโมเนีย อินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : ปริมาณของแอมโมเนีย อินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนการชะละลาย ไอออนคลอไรด์ของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม แตกต่างกัน

จากการทดสอบพบว่าค่า p-value = 0.838 และ 0.457 สำหรับปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$  แสดงว่าปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 และปริมาณแอมโมเนีย มีค่า p-value = 0.016 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

#### ตาราง ค-2 ทดสอบความแตกต่าง

##### Kruskal-Wallis Test

	Columns	N	Mean Rank	Chi-Square	df	Asymp. Sig.
TP	ทราย	9	10.94			
	ดินตะกอน	9	15.72			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	15.33			
	Total	27		2.013	2	.366
OP	ทราย	9	6.28			
	ดินตะกอน	9	18.83			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	16.89			
	Total	27		13.060	2	.001
Sulphate	ทราย	9	5.67			
	ดินตะกอน	9	17.67			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	18.67			
	Total	27		14.952	2	.001

	Columns	N	Mean Rank	Chi-Square	df	Asymp. Sig.
Cl	ทราย	9	5.00			
	ดินตะกอน	9	17.89			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	19.11			
	Total	27		17.480	2	.000
NH <sub>3</sub> -N	ทราย	9	8.39			
	ดินตะกอน	9	15.67			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	17.94			
	Total	27		8.271	2	.016
Org-N	ทราย	9	14.11			
	ดินตะกอน	9	16.28			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	11.61			
	Total	27		.457	2	.838
NO <sub>3</sub> -N	ทราย	9	14.00			
	ดินตะกอน	9	12.89			
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	15.11			
	Total	27		.838	2	.457

## Mann-Whitney Test

Columns	N	Mean Rank	Sum of Ranks	Sig.	
Sulphate	ทราย	9	5.44	49.00	0.000
	ดินตะกอน	9	13.56	122.00	
	Total	18			
Sulphate	ทราย	9	5.22	47.00	0.000
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	13.78	124.00	
	Total	18			
Sulphate	ดินตะกอน	9	9.11	82.00	0.796
	ดินตะกอนผสมสารส้ม	9	9.89	89.00	
	Total	18			