ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายด้วยตะกอนสารส้ม

ISOTHERM AND KINETIC ANALYSIS OF PHOSPHATE ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING WASTE ALUM SLUDGE

นิลยาวดี สูไชยี

จิตรา ธีระบัญญาพัช

ณริศา ตั้งทองมั่น

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายฟอสเฟต ด้วยตะกอนสารส้ม

ISOTHERM AND KINETIC ANALYSIS OF PHOSPHATE ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING WASTE ALUM SLUDGE

กัลยาวดี สูไซนี

จิตรา ธีระปัญญาชัย

ณริศา ตั้งทองปั้น

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ISOTHERM AND KINETIC ANALYSIS OF PHOSPHATE ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING WASTE ALUM SLUDGE

KANLAYAWADEE HOOSAINEE
JITTRA TEERPANYACHAI
NARISA TANGTHONGPAN

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

โครงงานพิเศษ	ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม ISOTHERM AND KINETIC ANALYSIS OF PHOSPHATE ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING WASTE ALUM SLUDGE
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัลยาวดี ฮูไซนี รหัส 53051151 นางสาวจิตรา ธีระปัญญาชัย รหัส 53051165 นางสาวณริศา ตั้งทองปั้น รหัส 53051179
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	
อ.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงงานพิเศษ	ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม ISOTHERM AND KINETIC ANALYSIS OF PHOSPHATE ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING WASTE ALUM SLUDGE
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัลยาวดี สูไชนี นางสาวจิตรา ธีระปัญญาชัย นางสาวณริศา ตั้งทองปั้น
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษฉบับนี้ เป็นการศึกษาการดูดซับสารละลายฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งดินตะกอนที่ใช้เก็บมาจากลานตากตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาบางเขน โดยทำการทดลองแบบแบตท์ (batch) สารละลายฟอสเฟต เตรียมจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ พีเอช ปริมาณดินตะกอน และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายฟอสเฟตเท่ากับ 4 ปริมาณดินตะกอนเท่ากับ 20.0 กรัมต่อลิตร และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 45 นาที โดยที่สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟอสเฟตของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีค่าเท่ากับ 98.86 และ 99.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่จุดสมดุลไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ และจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามแบบ Pseudo-second order

คำสำคัญ: การดูดซับ สารละลายฟอสเฟต ตะกอนสารส้ม ไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์

Title	ISOTHERM AND KINETIC ANALYSIS OF PHOSPHATE FROM AQUEOUS SOLUTION USING WASTE ALUM SLUDGE	
Students	Miss Kanlayawadee	Hoosainee
	Miss Jittra	Teerapanyachaii
	Miss Narisa	Tangthongpan
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Asst.Prof.Pitsamai	Chairat-utai

ABSTRACT

This project intends to study the adsorption of phosphate from aqueous solution using alum sludge and alum sludge spike with aluminum sulfate, which collected from Bangkhen Water Treatment Plant. The experiments were carried out in batch. Aqueous phosphate solution used in the experiments was prepared from KH_2PO_4 50 mg/L phosphate in different conditions. The studied factors were pH, quantity of alum sludge, and contact time. The results showed that optimum pH for phosphate adsorption in wastewater was 4, quantity of alum sludge was 20.0 g/L and contact time was 45 minutes. Percentage adsorption of phosphate using alum sludge and alum sludge spike with aluminum sulfate at optimum condition were 98.86 and 99.00 percents, respectively. Equilibrium adsorption isotherm was well explained by Langmuir adsorption isotherm. The experimental data from kinetic study were properly correlated with pseudo-second order kinetic model.

Keywords : Adsorption, Phosphate, Alum sludge, Isotherm, Kinetic

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ อ.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ต่างๆในการทำโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่การประปานครหลวง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้ความรู้ และอนุเคราะห์ตะกอนสารส้มสำหรับโครงงานพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมี เป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีตลอดมา

นางสาวกัลยาวดี ฮูไซนี
นางสาวจิตรา ธีระปัญญาชัย
นางสาวณริศา ตั้งทองปั้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป IX

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารส้มและตะกอนสารส้ม 3

2.2 รูปและแหล่งของฟอสเฟต 4

2.2.1 รูปของฟอสเฟต 4

2.2.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต 5

2.3 เทคโนโลยีในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย 6

2.3.1 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ 6

2.3.2 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี 6

2.3.3 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพ 9

2.3.3.1 กระบวนการดูดซับ 9

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมี 20

3.1.1 อุปกรณ์ 20

3.1.2 สารเคมี 20

3.2 ลักษณะตะกอน และสารละลายฟอสเฟตที่ใช้ในการทดลอง 21

3.2.1 การเตรียมดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม 21

3.2.2 การเตรียมสารละลายฟอสเฟต 21

3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายฟอสเฟต 21

3.3.1 ค่าพีเอช 21

3.3.2 ปริมาณตัวดูดซับ 22

3.3.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 22

3.4 วิธีการวิเคราะห์เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 23

3.5 วิธีการวิเคราะห์เพื่อศึกษาจลหพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 23

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนสารส้มที่ใช้ในการทดลอง 26

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 26

4.2.1 ผลของพีเอช 26

4.2.2 ผลของปริมาณ 27

4.2.3 ผลของะยะเวลา 28

4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 29

4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย 38

5.2 ข้อเสนอแนะ 38

เอกสารอ้างอิง 39

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ 41

ก-1 วิธีการเตรียมดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม 41

ก-2 วิธีการเตรียมสารละลายฟอสเฟต 41

ก-3 วิธีการวิเคราะห์น้ำ 41

ก-3.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 41

ก-3.2 การวิเคราะห์ออโธฟอสเฟต(Phosphate) 42

ภาคผนวก ข ผลการทดลอง 46

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆ ในตะกอนสารส้ม 4

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นออโธฟอสเฟตที่เริ่มต้นและที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มเป็นตัวดูดซับ 30

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออโธฟอสเฟตโดยใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 32

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่และค่าความถูกต้องของชุดข้อมูลจากสมการฟรุนดิชและแลงเมียร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟต 34

ตารางที่ 4.4 อัตราเร็วการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 37

ตาราง ข.1 ผลการวิเคราะห์พีเอชที่เหมาะสม : ทราย 47

ตาราง ข.2 ผลการวิเคราะห์พีเอชที่เหมาะสม : ดินตะกอน 48

ตาราง ข.3 ผลการวิเคราะห์พีเอชที่เหมาะสม : ดินตะกอนผสมสารส้ม 49

ตาราง ข.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสม : ทราย 50

ตาราง ข.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสม : ดินตะกอน 51

ตาราง ข.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสม : ดินตะกอนผสมสารส้ม 52

ตาราง ข.7 ผลการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสม : ทราย 53

ตาราง ข.8 ผลการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสม : ดินตะกอน 54

ตาราง ข.9 ผลการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสม : ดินตะกอนผสมสารส้ม 55

ตาราง ข.10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอน 56

ตาราง ข.11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม 58

ตาราง ข.12 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 60

ตาราง ข.13 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 61

ตาราง ข.14 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร 62

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ข.15 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 63

ตาราง ข.16 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 64

ตาราง ข.17 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 65

ตาราง ข.18 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 66

ตาราง ข.19 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร 67

ตาราง ข.20 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 68

ตาราง ข.21 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 69

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบพื้นฐาน 13

รูปที่ 2.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช 14

รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช 14

รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์ 15

รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ 16

รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง 17

รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาอับดับสอง 18

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน 24

รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน 25

รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน 25

รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับออโธฟอสเฟตหลังการดูดซับด้วยดินทั้ง 3 ชนิด ที่พีเอชต่างๆ 27

รูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับออโธฟอสเฟตหลังการดูดซับด้วยดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณต่างๆ 28

รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับออโธฟอสเฟตหลังการดูดซับด้วยดินทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลาต่างๆ 29

รูปที่ 4.4 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับออโธฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 33

รูปที่ 4.5 ฟลุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับออโธฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 33

รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับออโธฟอสเฟสด้วยดินตะกอน 35

รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม 35

รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับออโธฟอสเฟสด้วยดินตะกอน 36

รูปที่ 4.9 ปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม 37

รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร 44

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเน่าเสีย เกิดจากแหล่งน้ำมีธาตุอาหารพืชเจือปนอยู่มาก โดยที่มาของสารอาหารหลัก เช่น ไนโตรเจน และฟอสเฟต มาจากน้ำเสียจากชุมชน และร้อยละ 30 ของปริมาณฟอสเฟตทั้งหมดมาจากสารซักฟอกสังเคราะห์ (Synthetic Detergents) ที่ใช้กันโดยทั่วไปในบ้านเรือน (Hammer,1996) และปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ทำการบำบัดก่อนทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) คือ สภาวะที่สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว เจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการแย่งอาหารกัน พืชน้ำ และสาหร่ายใช้ออกซิเจนที่ละลายน้ำในการหายใจ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง ส่งผลต่อทั้งพืชน้ำ และสัตว์น้ำขาดออกซิเจนและตายลงในที่สุด ดังนั้นกรมควบคุมมลพิษจึงได้มีการกำหนดเกี่ยวกับมาตรฐานฟอสเฟตในน้ำทิ้งประเภทต่างๆ เช่น มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ให้มีค่าไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม,2553) มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ให้มีค่าไม่เกิน 0.4 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม,2547)

ในกระบวนการผลิตน้ำประปา จะต้องมีขั้นตอนการตกตะกอน (Clarification) เพื่อทำน้ำให้ใส โดยการเติมปูนขาว สารส้ม หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ เพื่อช่วยในการรวมตะกอนและตกตะกอนของอนุภาคของแข็งในน้ำดิบ ลักษณะของดินตะกอนที่ตกลงมา จะมีสารเคมีบางส่วนปนอยู่และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ ตะกอนสารส้ม (Alum sludge) ในประเทศไทยมีโรงผลิตน้ำประปาจำนวนมากนั่นหมายถึงจะเกิดของเสียที่เรียกว่า ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาที่จะต้องกำจัดจำนวนมาก ปริมาณ 75,00-105,000 กิโลกรัมต่อวันหรือประมาณ 75-105 ตันต่อวัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความต้องการในการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น(การประปานครหลวง, 2555) ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะถูกกำจัดโดยนำมาทิ้งที่บ่อกักตะกอน ปล่อยให้ตกตะกอนสะสมจนข้นขึ้น แล้วจึงใช้เรือสูบนำมาที่บ่อตากตะกอน และลานตากตะกอนเพื่อให้ตากตะกอนให้แห้ง ปัญหาที่พบในปัจจุบันนี้คือพื้นที่ในการจัดการกากตะกอนไม่เพียงพอ ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจ้างรถขุดดินเพื่อพลิกตะกอนให้แห้งเร็วขึ้น(การประปานครหลวง, 2548) รวมถึงการทำดินตะกอนให้แห้งอีกวิธีหนึ่งด้วยเครื่องอัดตะกอน (Filter press) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง จึงได้มีแนวคิดในการนำดินตะกอนมาใช้ประโยชน์อย่าง

กว้างขวาง เช่น การกำจัดโลหะหนัก การกำจัดฟอสฟอรัส ในน้ำเสีย (ขนิษฐา,2555);(อัจจิมา,2556);(วาดวัน,2556) การกำจัดสารลดแรงตึงผิว ในน้ำเสียอุตสาหกรรม (ศิลป์ชัย,2551) เนื่องจากตะกอนสารส้ม (Alum sludge) ประกอบด้วย คอลลอยด์อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หลายสปีชีส์ $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_5^{2-}$, $Al(OH)_{17}^{+4}$ และ $Al(OH)_{34}^{+5}$ และมีพื้นผิวที่จะดูดยึดกับประจุลบเข้าไปด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ (Ligand exchange) และการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) โดยกลไกหลักที่ใช้ในการกำจัดไอออนฟอสเฟต คือ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ดังนั้น โครงงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาลักษณะการดูดซับ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ รวมทั้งสมดุล และจลนพลศาสตร์ ที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายฟอสเฟต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม
2. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม
3. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองศึกษาแบบแบตท์ (batch test) และตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษา คือ ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

2. สารละลายฟอสเฟต เตรียมจากโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่

   3.1 ค่าพีเอช ที่ 4, 5, 6, 7 และ 8

   3.2 ปริมาณของตัวดูดซับ ที่ 0.1 , 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 กรัม

   3.3 ระยะเวลาสัมผัส ที่ 15 , 30 , 45 , 60 และ 120 นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำตะกอนสารส้มที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปา มาใช้บำบัดน้ำเสียที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ

2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำทิ้งชุมชนได้

3. เป็นการลดปริมาณของเสีย โดยการนำตะกอนสารส้มกลับมาใช้ประโยชน์

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารส้มและตะกอนสารส้ม

สารส้ม (alum) สูตรเคมี คือ $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ หรือหมายถึง กลุ่มของสารประกอบอื่นๆ ในสูตร $AB(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ซึ่งถูกเรียกว่าสารส้มเช่นกัน

ในการทำน้ำดิบให้กลายเป็นน้ำใสต้องมีการเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน โดยสารที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือสารส้ม เนื่องจากมีประจุบวกมาก และมีราคาถูกกว่าสารชนิดอื่นโดยอาจใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) หรือเฟอร์ริคซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) แทนสารส้มได้ เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำดิบ จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ(Hydrolysis) โดยมีปฏิกิริยาทางเคมี (2.1) – (2.3) (Hannah และคณะ, 2510)

$$Al^{3+} + H_2O \longrightarrow Al(OH)^{2+} + H^+ \qquad (2.1)$$

$$Al^{3+} + 2H_2O \longrightarrow Al(OH)_2^{+} + 2H^+ \qquad (2.2)$$

$$7Al^{3+} + 17H_2O \longrightarrow Al(OH)_{17}^{4+} + 17H^+ \qquad (2.3)$$

ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว การทำปฏิกิริยากับน้ำดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ดังปฏิกิริยา (2.4)

$$Al^{3+} + 3H_2O \longrightarrow Al(OH)_3\,(s) + 3H^+ \qquad (2.4)$$

คุณสมบัติทั่วไปของตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา

1) อุดมด้วยสารอนินทรีย์

2) ขาดสารอินทรีย์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

3) ขาดสารกลุ่มใยอาหาร (fiber)

4) มีปริมาณสารอลูมิเนียมสูงกว่าดินทั่วไปสารอลูมิเนียมดังกล่าวได้มาจากการใช้สารส้มเป็นตัวตกตะกอน

5) ปริมาณมวลสารที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

6) มีปริมาณตะกอนดินปริมาณมากเพียงพอที่จะเป็นวัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรม

7) ตะกอนดินมีคุณสมบัติเป็นเนื้อดินเบาอุ้มน้ำจะพองตัวได้เมื่อชุ่มน้ำ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆในตะกอนสารส้ม

Chemical composition	Unit	Amount
Aluminum (as Al_2O_3)	mg/g	458-463
Iron (as Fe_2O_3)	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^-	mg/g	16.0-16.2
SO_4^{2-}	mg/g	8.2-8.4
SiO_4^{2-}	mg/g	10.6-11.8
H_2O at 105°C (moisture content)	%	10.2
H_2O at 1000°C	mg/g	260-270

ที่มา : (การประปานครหลวง, 2548)

2.2 รูปและแหล่งของฟอสเฟต

2.2.1 รูปของฟอสเฟต

ฟอสฟอรัส พบได้ทั้งในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียในรูปของฟอสเฟต ปัจจุบันนิยมจำแนกฟอสฟอรัสได้ 3 ประเภท คือ ออโธฟอสเฟต คอนเดนซ์ฟอสเฟต (โพลีฟอสเฟตต่างๆ) และสารอินทรีย์ฟอสเฟต อาจพบฟอสฟอรัสได้ทั้งในรูปสารละลาย สารแขวนลอยในน้ำ ตะกอนดินก้นบ่อ ตลอดจนในตัวของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ออโธฟอสเฟต และคอนเดนซ์ฟอสเฟตมักพบในรูปสารละลายในน้ำ และรวมเรียกว่า Soluble reactive phosphorus สารอินทรีย์ฟอสเฟตในน้ำอาจอยู่ในรูปสารละลายเชิงซ้อน หรือในรูปตะกอนแขวนลอยก็ได้ (มั่นสิน และ มั่นรักษ์, 2545)โดยสารประกอบฟอสเฟตในน้ำ อาจแบ่งได้ดังนี้ (กรรณิการ์, 2522)

1) ออโธฟอสเฟต (Orthophosphate) ที่พบมาก คือ

Trisodium phosphate (Na_3PO_4)

Disodium phosphate (Na_3HPO_4)

Monosodium phosphate (NaH_2PO_4)

Diammonium phosphate $(Na_4)_2PO_4$

2) โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) ที่พบมาก คือ

Sodium hexametaphosphate $Na_3(PO_4)_6$

Sodium tripolyphosphate ($Na_5P_3O_{10}$),

Tetra sodium pyrophosphate ($Na_4P_2O_7$)

3) อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) ที่พบมาก คือ

Nucleic acid

Phospholipids

Sugar phosphate

รูปต่างๆของฟอสเฟตมีแหล่งกำเนิดหลากหลาย เช่น กระบวนการผลิตน้ำประปาต้องมีการเติมโพลีฟอสเฟตปริมาณเล็กน้อย เพื่อใช้ปรับสภาพของน้ำประปา มิให้กัดกร่อนหรือตกตะกรันในเส้นท่อ ผงซักฟอกก็มีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบสำคัญ ปุ๋ยต้น ไม้ก็มีฟอสเฟต เป็นต้น

ฟอสฟอรัสประเภทต่างๆ อาจจำแนกได้ตามวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ดังนี้

1) ฟอสฟอรัสละลายน้ำ หมายถึง ฟอสฟอรัสที่กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาดรู 0.45 ไมครอน

2) ฟอสฟอรัสแขวนลอย หมายถึง ฟอสฟอรัสที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาดรู 0.45 ไมครอน

3) ฟอสฟอรัสแบบรีแอกทีฟ (Reactive) หมายถึง ฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนไฮโดรไลซีส หรือย่อยสลายด้วยกรด ฟอสฟอรัสรีแอกทีฟทั้งหมด หรือเกือบทั้งหมดจะเป็นออโธฟอสฟอรัส และพบได้ทั้งในรูปละลายน้ำหรือแขวนลอย

4) ฟอสฟอรัสแบบ Acid Hydrolysable หมายถึง ฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์ได้จากการใช้กรดสร้างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับตัวอย่าง น้ำที่อุณหภูมิของน้ำเดือด สภาวะเช่นนี้จะเกิดการเปลี่ยนรูปของคอนเดนซ์ฟอสเฟต ทั้งในรูปละลายน้ำและแขวนลอย ให้กลายเป็นออโธฟอสเฟต

5) ฟอสฟอรัสอินทรีย์ หรือสารอินทรีย์ฟอสเฟต หมายถึง ฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์ได้จากการย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรดเข้มข้นอย่างแรง ฟอสฟอรัสที่รวมอยู่กับอินทรีย์สารจะถูกเปลี่ยนเป็นออโธฟอสเฟต เมื่อถูกออกซิไดส์ด้วยสารละลายกรดเข้มข้นดังกล่าว

2.2.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต

ฟอสเฟตส่วนใหญ่ มาจาก 2 แหล่งใหญ่ๆด้วยกัน (อุบลวรรณ, 2536) คือ

1) แหล่งจากธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศซึ่งถูกฝนพัดพาให้ตกลงสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งฝนที่ตกลงมายังพื้นดินพัดพาเศษดินและหินที่มีฟอสเฟสลงสู่แหล่งน้ำ

นอกจากนี้ยังอาจมาจากมูลของนกบางชนิด เศษซากพืชซากสัตว์ที่ตายทับถมกันในแหล่งน้ำ การสะสมดังกล่าวอาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชั่นในแหล่งน้ำได้

2) แหล่งที่มาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม และปศุสัตว์ แม้ว่าจะมีการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวแล้ว แต่ยังคงมีฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามสามารถควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสที่ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติด้วยสาเหตุจากกิจกรรมของมนุษย์ได้ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่พบว่าน้ำทิ้งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง ได้แก่ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานปุ๋ย ฯลฯ (ธงชัย และคณะ, 2536)

2.3 เทคโนโลยีในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

2.3.1 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ

ฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดโดยทางชีวภาพ โดยการดูดซับออโธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และอินทรีย์ฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปเนื้อเยื่อเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดในระหว่างการบำบัดขั้นสองอยู่ในรูปตะกอน มีตั้งแต่ร้อยละ 10 – 30 ของปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบบำบัด (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2536) โดยจุลินทรีย์ไม่เพียงแต่ใช้ฟอสฟอรัสในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของเซลล์ ยังใช้ในการสังเคราะห์สาร และถ่ายทอดพลังงานในเซลล์ รวมทั้งยังสามารถเก็บฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์เป็นพลังงานสะสมในสภาวะการบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้อากาศ และสภาวะไร้อากาศ เรียกว่า การบำบัดหลัก (mainstream) ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสในดินตะกอนที่สูบกลับ (return sludge) เรียกว่า การบำบัดตะกอน (sidestream)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ที่นิยมใช้กันมาก มีหลักการว่า ในสภาวะไร้อากาศซึ่งมีค่ากรดสูง จุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่สะสมในรูปสารประกอบโพลีฟอสเฟต และจะปลดปล่อยฟอสเฟตออกจากเซลล์ เพื่อที่จะใช้สารอินทรีย์ที่ใช้ได้ง่าย คือ กรดไขมัน แต่เมื่อจุลินทรีย์ถูกป้อนเข้าสู่บริเวณที่มีออกซิเจน (aerobic reaction) จุลินทรีย์พยายามสะสมฟอสฟอรัสในรูปของโพลีฟอสเฟสไว้ในเซลล์ในปริมาณมากกว่าปกติ (luxury uptake) นั่นคือฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกจากน้ำในรูปตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้หลักการควบคุมสภาวะแวดล้อมระหว่างสภาพไร้อากาศ และสภาพมีออกซิเจน

2.3.2 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นกระบวนการฟิสิกส์ – เคมี ที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้มาอยู่ในรูปของตะกอน ซึ่งจะแยกออกจากสารละลายนั้นได้ การตกตะกอนทางเคมีขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายในน้ำของสารนั้นๆ ซึ่งการตกตะกอนทาง

เคมีเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยมีกระบวนการเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง หรือหลายขั้นตอนรวมกัน ดังต่อไปนี้ (อุบลวรรณ กมลศิริประเสริฐ, 2536)

1) ใส่สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายในน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อย

2) ใส่สารซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะสมดุลของการละลายน้ำ (Solubility equilibrium) ให้เลื่อนมาถึงจุดที่สารละลายในน้ำไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป จึงเกิดการรวมตัวและตกตะกอน

3) เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัว หรือเกือบอิ่มตัวไปในทิศทางที่ทำให้ค่าการละลายลดลงจนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็ง เนื่องจากค่าการละลายน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นกระบวนการที่แตกต่างจากโค-แอกกูเลชั่น (Coagulation) เพราะการตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารลงไปในน้ำ เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ ซึ่งเป็นการตกตะกอน ที่ใหญ่และหนัก จมตัวได้ ส่วนใหญ่โคแอกกูเลชั่นเป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สิ่งสกปรกที่เป็นตะกอนขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ ในทางปฏิบัติการตกตะกอนทางเคมีมักถูกเรียกรวมๆ กันไปเป็นโคแอกกูเลชั่น

ในปัจจุบันสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสมีหลายชนิด ได้แก่ (จารุวรรณ, 2538)

1) เบนโทไนท์ (Bentonite)

เป็นดินเหนียวที่เกิดจากการสะสมของเถ้าภูเขาไฟ ประกอบด้วยเบนไทโนท์ร้อยละ 55 สารอนินทรีย์ร้อยละ 45 ซึ่งอยู่ในรูปของอลูมิเนียมออกไซด์ เฟอรัสออกไซด์ ซิลิคอนออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ มีข้อดี คือ

ก. ใช้กับน้ำที่มีความขุ่นเพื่อเพิ่มเป้าสัมผัสในน้ำได้

ข. สามารถดูดซับประจุบวกได้ดี

ค. ราคาถูก หาได้ง่าย

ง. ตะกอนมีน้ำหนักจึงตกเร็ว

จ. พีเอชมักไม่มีผลต่อการตกตะกอน

แต่มีข้อเสียคือ มักจับตัวกันเป็นก้อนเหนียว เมื่อใส่ลงไปในน้ำทีเดียว ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงนิยมตี หรือกวน ให้ก้อนดินแตกก่อนแล้วค่อยผสมลงไปในน้ำ

2) ปูนขาว (Lime) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ มีข้อดี

ก. ราคาถูก

ข. สร้างตะกอนได้ดี ทำให้พีเอชหลังตกตะกอนมีค่าสูงขึ้น

แต่มีข้อเสียคือจะเกิดตะกอนมาก ทำให้มีปัญหาในการกำจัด โดยปูนขาวทำปฏิกิริยากับความเป็นด่าง และฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกซีอาพาไทต์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3) อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_2$) หรือ สารส้ม มีข้อดี คือ

ก. ราคาถูก หาซื้อง่าย

ข. จับตัวกันเป็นก้อนกับคอลลอยด์ได้ดี

ค. ใช้งานง่าย

ง. ละลายน้ำได้ 86.9 ส่วน ต่อน้ำ100 ส่วน ที่ 0 องศาเซลเซียส

ข้อเสีย คือ

ก. เป็นเกลือของกรดที่ละลายน้ำได้ดี เกิดสภาพกรดทำให้เกิดการกัดกร่อนภาชนะที่ใช้งานตลอดจนคอนกรีต

ข. ทำให้เกิดความกระด้างถาวรเพิ่มขึ้น

ค. ต้องเพิ่มความเป็นกรด – ด่าง ให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน แต่ถ้าเพิ่มความเป็นด่างมากเกินไปจะเกิดความคงทนของสีในน้ำได้

ง. เพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้ ทำให้เพิ่มการกัดกร่อน

จ. ปฏิกิริยามักเกิดไม่ค่อยสมบูรณ์ ถ้าในน้ำมีปริมาณคอลลอยด์มากอาจไปขัดขวางปฏิกิริยาได้ ทำให้มีค่าปริมาณสารส้มเหลือในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบกำจัดมาก ทำให้เกิดการอุดตันต่อสารกรองได้ โดยมักจะอยู่ในรูป Al_2O_3 ไม่ได้อยู่ในรูป $Al_2(SO_4)_3$ และสารส้มที่ตกค้างมักไม่เกิน 0.3 มก./ล.

4) เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) หรือ copperas มีข้อดี คือ

ก. ตกตะกอนได้ที่พีเอชกว้าง ประมาณ 4 - 10

ข. เวลาในการตกตะกอน และรวมตัวให้เกิดตะกอน จะสั้นกว่าสารส้ม

ค. ตะกอนที่ได้มีขนาดใหญ่

ง. มีเหล็กออกสู่น้ำทิ้งน้อย

จ. ประหยัด และราคาถูกกว่าสารส้ม

ข้อเสีย คือ

ก. มักให้ตะกอนสีน้ำตาลแดง

ข. เกิดการกร่อนถ้าอยู่ในรูป Fe^{2+}

ค. ไม่เหมาะสมกับน้ำที่มีความเป็นด่างต่ำ และมีสี

2.3.3 การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพ

2.3.3.1 การดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ(adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

องค์ประกอบต่อการดูดซับ

1) พื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการดูดซับ

2) การแลกเปลี่ยนใช้สารดูดซับต้องดูคุณสมบัติของสารประกอบโพลาร์ หรือนอนโพลาร์

3) การดูดซับจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแก๊สและสารละลายที่ต้องการจับ

4) ความจุของสารดูดซับควรมีค่าแน่นอน และสูงกว่าปริมาณแก๊สหรือสารละลายที่ต้องการจับ แต่หลังจากที่เต็มความจุของมันแล้ว แก๊สและสารละลายจะดูดซับเพียงบางส่วน จนอิ่มตัวแล้วจะไม่ดูดซับ

กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักพวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำ ให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว - ของเหลว, ก๊าซ – ของเหลว, ก๊าซ - ของแข็ง และของเหลว - ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะแบบ ของเหลว- ของแข็ง (Liquid - Solid Interface) ในการดูดติดผิว โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (มั่นสิน, 2545) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion)

การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลว เข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion)

เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction)

ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545) ดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interpartical transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลาย เข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับ

รูปแบบของการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารที่เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งอยู่ในตัวกลางใดๆ ไปเกาะบนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งสารตัวกลางนั้นเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ (นิพนธ์, 2550)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์(electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (พันธะโควาเลนต์) เกิดแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่าการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area)

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ

2) ลักษณะของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate characteristics)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

3) อัตราเร่งของการปั่นกวน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอยด้วย การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรงซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนกวนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นกวนสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4) เวลาสัมผัส (Contact time)

ระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

5) หมู่ฟังก์ชันที่ผิวตัวดูดซับ

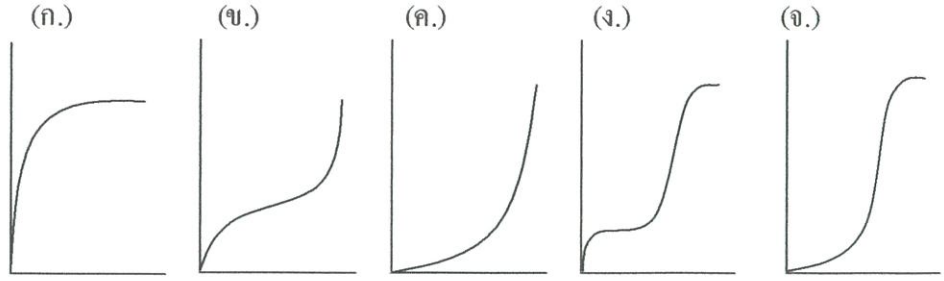
หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากความสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับ แล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้

6) ความเป็นกรด–ด่าง (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการแพร่กระจายหรือการเปลี่ยนรูป (species) ดังนั้นค่าพีเอชของสารละลายจึงมีผลต่อการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันบนผิวตัวดูดซับด้วย

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอน จะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับ 5 แบบ ดังนี้



รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบพื้นฐาน (ธิยา, 2542)
จากรูปที่ (ก.) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว
(ข.) ถึง (จ.) เป็นไอโซเทอมของการดูดซับแบบหลายชั้น

7.1 สมการการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่า พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface : พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบตามสมการ (2.5)

$$q = KC^{1/n} \qquad (2.5)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ
หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg, mg/kg

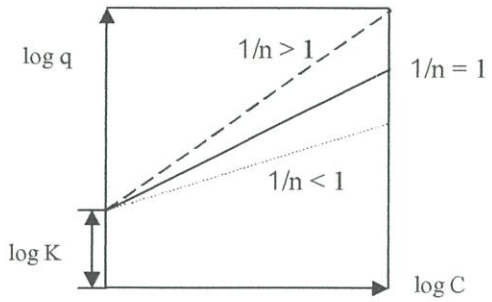
C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย
หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/l

สมการที่ 1 ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดลิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วๆ ไป n จะมีค่ามากกว่า 1

เมื่อจัดรูปสมการที่ 1 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอกการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ (2.6)

$$\log q = \log K + (1/n) \log C \qquad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log K และ log C จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ log K



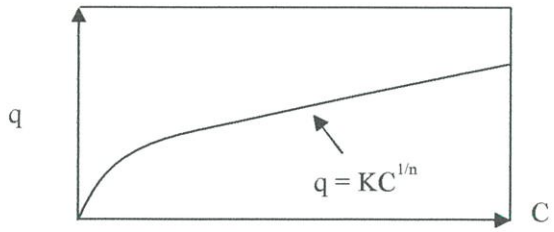
รูปที่ 2.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช (นิพนธ์, 2550)

ถ้า 1/n = 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า 1/n < 1 บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือ กล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า 1/n > 1 บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C ดังรูปที่ 2.3 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้มากที่สุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช (นิพนธ์, 2550)

7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

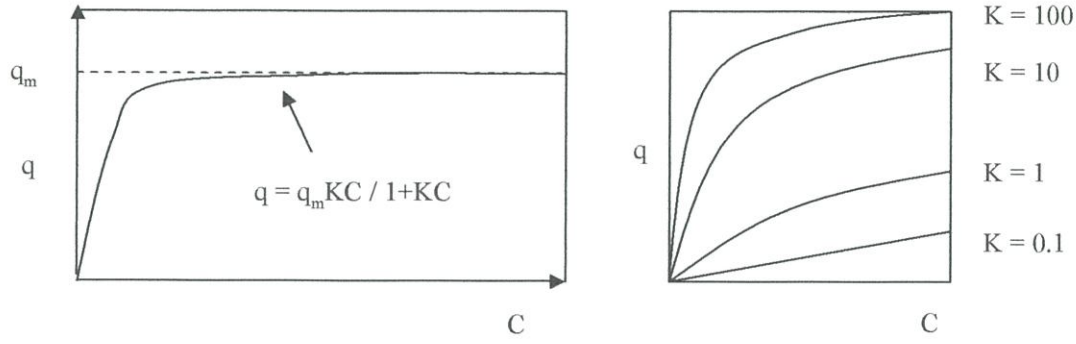
มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนผิวตัวดูดซับ โดยโมเลกุลตัวดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการ

เคลื่อนย้าย หรือเปลี่ยนตำแหน่งกับตัวดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) มีรูปแบบสมการ (2.7)

$$q = q_m KC / 1+KC \qquad (2.7)$$

เมื่อ q_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อตัวดูดซับ

เขียนกราฟระหว่าง q และ C จากสมการ (2.7) จะได้กราฟดังรูปที่ 2.4

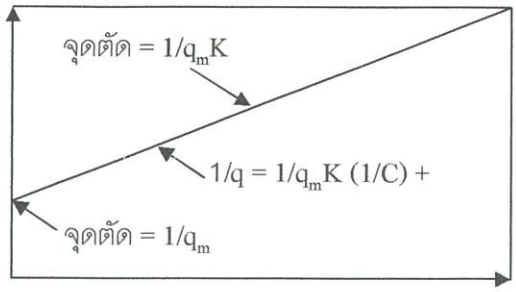


รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์ (นิพนธ์, 2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ 3 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้ สมการ (2.8)

$$1/q = 1/q_m K (1/C) + 1/q_m \qquad (2.8)$$

เขียนกราฟระหว่าง 1/q และ 1/C จะได้สมการเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/q_m K$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $1/q_m$ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ (นิพนธ์, 2550)

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

การเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก อันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารละลายกับปริมาณฟอสเฟตบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสมดุล ซึ่งภายหลังจากเข้าสมดุลแล้ว ระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบใดๆกับระบบอีก

โดยผลจากการศึกษาระยะเวลาของการดูดซับกับปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ สามารถนำมาสร้างจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetics) ซึ่งรูปแบบของสมการที่นิยมมีด้วยกัน 2 สมการ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order kinetics) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (pseudo second order kinetics)

1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

การสลายสารในรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.9) - (2.14)

$$-dc / dt = kC \qquad (2.9)$$

ปรับสมการได้ดังนี้

$$dc / c = - kdt \qquad (2.10)$$

อินทิเกรต จะได้

$$\int_{c0}^{ct} 1 / c = \int_{0}^{t} - kdt \qquad (2.11)$$

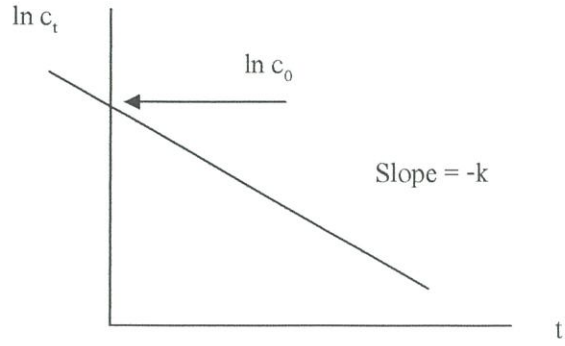
$$\ln (c_t / c_0) = - kt \qquad (2.12)$$

$$C_t = C_0 e^{-kt} \qquad (2.13)$$

หรือ

$$\ln c_t = \ln c_0 - kt \qquad (2.14)$$

จากสมการ จะเห็นว่า ถ้าพล็อตกราฟโดยให้แกน X เป็นเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (t) และ แกน Y เป็นค่า $\ln c_t$ สำหรับปฏิกิริยาที่เป็นอันดับหนึ่งจะแสดงกราฟเส้นตรง โดยมีค่าความชันเท่ากับ –k และตัดแกน Y ($\ln c_t$) ที่จุดหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\ln c_0$ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ชลอ, 2555)

2) ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสองเป็นปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดสัมพันธ์กับค่ากำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่ง หรือสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารทั้งสองตัว ดังสมการ (2.15) - (2.20)

$$-dC_A / dt = kC_A^2 \quad (2.15)$$

หรือ $$-dC_B / dt = kC_B^2 \quad (2.16)$$

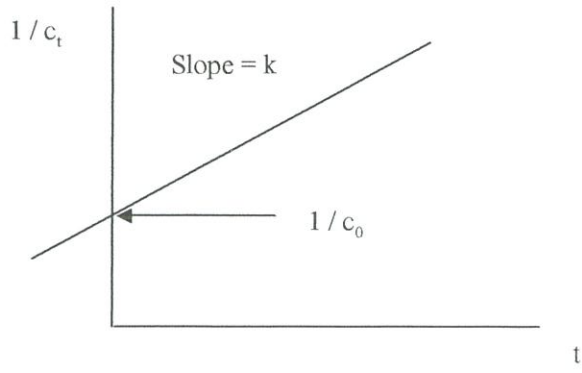
กรณี $$-dC_A / dt = kC_A^2 \quad (2.17)$$

อินทิเกรต จะได้ $$\int_{c0}^{ct} dc / c^2 = \int_0^t - kt \quad (2.18)$$

$$1 / c_t - 1 / c_0 = kt \quad (2.19)$$

$$1 / c_t = 1 / c_0 + kt \quad (2.20)$$

จากสมการ ถ้าพล็อตกราฟระหว่าง t (แกน X) และ $1 / c_t$ (แกน Y) จะได้กราฟเส้นตรง ถ้าปฏิกิริยานั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ k และจุดตัดแกน Y มีค่า $1 / c_0$ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาอันดับสอง (ชลอ, 2555)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Babatunde และ Zhao (2010) ทำการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษากลศาสตร์การดูดซับฟอสฟอรัสโดยใช้ดินตะกอนสารส้ม (alum sludge) รูปแบบการดูดซับที่แตกต่างกันนำมาอธิบายสภาวะสมดุลและจลหพลศาสตร์การดูดซับ สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า R^2 สูงที่สุดเมื่ออยู่ในกราฟไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ คืออยู่ระหว่าง 0.97 ถึง 0.98 และจากการศึกษาเกี่ยวกับความจุในการดูดซับ พบว่า ความจุในการดูดซับสูงสุด คำนวณจากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์คือ 31.9 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อน้ำหนักดินตะกอน 1 กรัม (mg P g^{-1}) ที่พีเอชเท่ากับ 4 และความจุในการดูดซับจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 9

Yang และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตะกอนสารส้มโดยวิธีการแบบแบตช์ (batch test) ศึกษากลไกของการดูดซับ และการแตกตัวของตะกอนสารส้มในน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (hydrolysis) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความจุในการดูดซับมีค่าลดลงจาก 3.5 เป็น 7.0 mg P / g sludge เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 4.3 เป็น 9.0 และการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ โดยมีฟอสเฟตเข้าไปแทนที่ไอออนที่จับอยู่บนผิวของตะกอนสารส้ม ด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ (Ligand exchange) และการตกตะกอน (precipitation)

สุธน (2545) ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตะกอนสารส้มที่นำมาจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ด้วยวิธีการตกตะกอนเคมี พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ที่ช่วง 5 ถึง 7 โดยที่พีเอช 6 เหมาะสมมากที่สุด ตะกอนสารส้มสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตโดยการห่อหุ้มคอลลอยด์ฟอสเฟต และตกตะกอนภายใต้การสร้างตะกอนแบบห่อหุ้มผลึก

ขนิษฐา จิตติมา และนิสรา (2555) ศึกษาการนำตะกอนสารส้มจากกระบวนการผลิตน้ำประปามากำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการแบบแบตท์ (batch test) จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ pH 6.0 และสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 98 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนสารส้มสามารถกำจัดฟอสเฟตในสารละลายได้มากขึ้น ขณะที่ไอออนคลอไรด์ ซัลเฟต และพีเอชของสารละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ที่ผิวของตะกอนสารส้ม (ligand exchange) ของไอออนต่างๆ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) คลอไรด์ (Cl^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และอินทรีย์วัตถุ

ยะโก๊ะ (2553) ศึกษาการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตเริ่มต้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปัจจัยการดูดซับที่เหมาะสม คือ เวลาการดูดซับ 30 นาที พีเอช 12 โดยใช้ซีโอไลต์ 1 กรัม ต่อปริมาตรน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และพฤติกรรมการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิชไอโซเทอม แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลายชั้น หรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี เมื่อประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักผ้าด้วยเครื่องอัตโนมัติผ่านชุดกรองแบบน้ำไหลอย่างต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงถึง 94.08 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาการดูดซับ 30 นาที ปริมาณซีโอไลต์ 100 กรัม ในชุดกรอง

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860 ประเทศเบลเยี่ยม
2. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AUX 220 ประเทศญี่ปุ่น
3. เครื่องยูวีวิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์)UV ยี่ห้อ (Thermo รุ่น Genesys 10s UV-vis
4. ตู้อบ (Drying Oven) ยี่ห้อ Fisher scientific รุ่น ISOTEMP ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องปั่นกวน ยี่ห้อ Fisher scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. อุปกรณ์สำหรับกรองลดความดัน
7. เครื่องบดดิน ยี่ห้อ BOSCO พร้อมตะแกรงแยก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 มิลลิเมตร
8. เครื่องเขย่า
9. เดสิเคเตอร์ พร้อมสารดูดความชื้น
10. เครื่องแก้ว
11. ขวดพลาสติกใส่สารตัวอย่าง
12. กระดาษกรอง

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต((KH_2PO_4)Anhydrous)) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต ($K(SbO)C_4H_4O_6.1/2\ H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Unilab ประเทศสหรัฐอเมริกา

3. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดท))$NH_{46}(Mo_7O_{24}.4H_2O$(เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

4. กรดแอสคอร์บิค)$C_6H_8O_6$ (เกรดวิเคราะห์ บริษัท LobaChemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย

5. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

6. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ($Conc.H_2SO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

7.โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax FinechemPty.Ltd ประเทศออสเตรเลีย

8. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc.HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.2 ลักษณะตะกอน และสารละลายฟอสเฟตที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 การเตรียมดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

ดินตะกอนที่นำมาใช้เก็บมาจากลานตากตะกอนของโรงผลิตน้ำบางเขนโดย วาดวัน และคณะ (2556) นำมาบดด้วยเครื่องบดดิน ร่อนดินที่บดด้วยตะแกรงขนาด 0.08 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่างดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.08 มิลลิเมตร

สำหรับดินตะกอนผสมสารส้ม เตรียมได้โดยละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต เข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมกับดินตะกอนที่ผ่านการทำให้แห้งและบดแล้ว ในอัตราส่วนดินตะกอนต่อสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต 1.35: 1 โดยมวลต่อปริมาตร แช่ทิ้งไว้ 1 คืน นำไปทำให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลมจะได้ดินตะกอนผสมสารส้ม ที่มีสารส้มเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำมาหาค่าความชื้นของดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม โดยการนำดินมาชั่งทราบน้ำหนัก ซึ่งเป็นน้ำหนักก่อนอบ และนำดินไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง และนำมาทิ้งไว้ใน เดซิเคเตอร์ 2 ชั่วโมง นำไปดินไปชั่งหาน้ำหนักหลังอบ คำนวณหาค่าความชื้นของดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม นอกจากดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มที่ใช้ในการทดลองแล้ว จะนำทรายที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 2 มิลลิเมตร มาใช้เป็นชุดควบคุม

3.2.2 การเตรียมสารละลายฟอสเฟต

สารละลายฟอสเฟตที่ใช้ เตรียมจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ความเข้มข้นเท่ากับ50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายฟอสเฟต

3.3.1 ค่าพีเอช

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ปรับพีเอช ของสารละลายฟอสเฟตเป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M และสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 M

3. แบ่งชุดการทดลองเป็น 3 ชุด ได้แก่ ตัวอย่างทราย ตัวอย่างดินตะกอน และตัวอย่างดินตะกอนผสมสารส้ม โดยเตรียมตัวอย่างละ 5 ขวด ขวดละ 2.0 กรัม เติมสารละลายฟอสเฟต ขวดละ 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอชแต่ละขวดให้เป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ โดยแต่ละพีเอช ทำแบลงค์อย่างละ 1 ขวด โดยใส่เฉพาะสารละลายฟอสเฟต จำนวน 50 มิลลิลิตร

4. นำตัวอย่างที่ได้ไปใส่เครื่องเขย่า อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

5. ทำการกรองแบบลดความดัน สารละลายที่กรองได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณออโธฟอสเฟตด้วยวิธีเทียบสีกับกรดแอสคอบิก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible Spectrophotometer

6. ทำซ้ำ 3 ครั้ง

3.3.2 ปริมาณตัวดูดซับ

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ปรับพีเอชของสารละลายฟอสเฟตให้เป็น 4

3. แบ่งชุดการทดลองเป็น 3 ชุด ได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม โดยเตรียมชุดละ 5 ขวด ขวดละ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม พร้อมทำแบลงค์ 1 ขวด เติมสารละลายฟอสเฟต ขวดละ 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอชให้เป็น 4

4. นำตัวอย่างที่ได้ไปใส่เครื่องเขย่า อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. ทำการกรองแบบลดความดัน สารละลายที่กรองได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณออโธฟอสเฟตด้วยวิธีเทียบสีกับกรดแอสคอบิก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible Spectrophotometer

6. ทำซ้ำ 3 ครั้ง

3.3.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ปรับพีเอชของสารละลายฟอสเฟตให้เป็น 4

3. แบ่งชุดการทดลองเป็น 3 ชุด ได้แก่ ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม โดยเตรียมชุดละ 5 ขวด ขวดละ 1.0 กรัม พร้อมแบลงค์ 1 ขวด เติมสารละลายฟอสเฟตขวดละ 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอช ให้เป็น 4

4. นำตัวอย่างที่ได้ไปใส่เครื่องเขย่า อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15, 30, 45, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

5. ทำการกรองแบบลดความดัน สารละลายที่กรองได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณออโธฟอสเฟตด้วยวิธีเทียบสีกับกรดแอสคอบิก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible Spectrophotometer

6. ทำซ้ำ 3 ครั้ง

3.4 วิธีการวิเคราะห์เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2. แต่ละความเข้มข้นจะแบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุด ได้แก่ ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม โดยเตรียมชุดละ 3 ขวด ขวดละ 1.0 กรัม เติมสารละลายฟอสเฟตขวดละ 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอชให้เป็น 4

3. นำตัวอย่างที่ได้ไปใส่เครื่องเขย่า อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. ทำการกรองแบบลดความดัน สารละลายที่กรองได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณออโธฟอสเฟตด้วยวิธีเทียบสีกับกรดแอสคอบิก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible Spectrophotometer

5.สร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับ และคำนวณค่าจากกราฟ

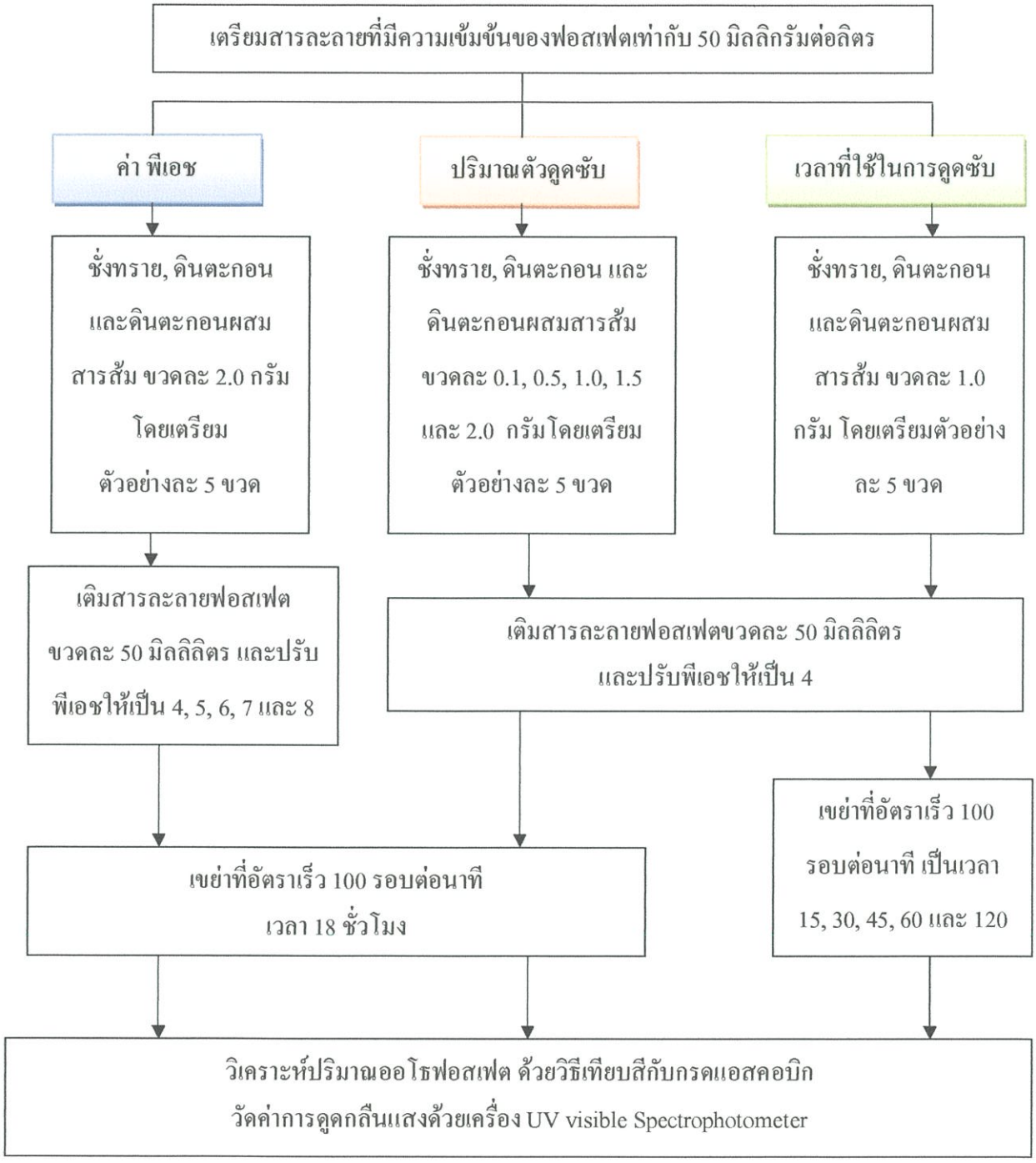
3.5 วิธีการวิเคราะห์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

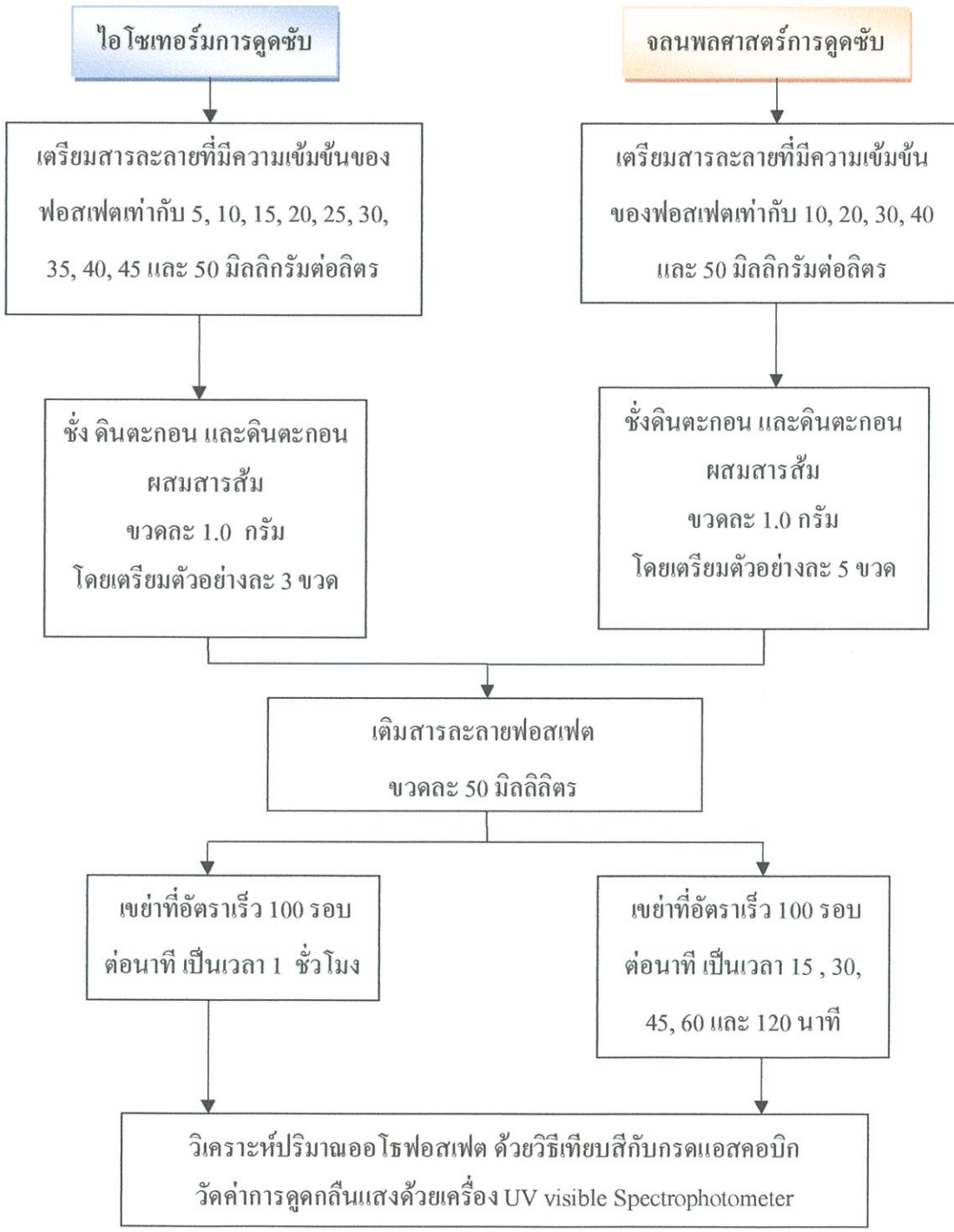
2. แต่ละความเข้มข้นจะแบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุด ได้แก่ ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม โดยเตรียมชุดละ 5 ขวด ขวดละ 1.0 กรัม เติมสารละลายฟอสเฟตขวดละ 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอช ให้เป็น 4

3. นำตัวอย่างที่ได้ไปใส่เครื่องเขย่า อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15, 30, 45, 60 และ 120 นาที

4. ทำการกรองแบบลดความดัน สารละลายที่กรองได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณออโธฟอสเฟตด้วยวิธีเทียบสีกับกรดแอสคอบิก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible Spectrophotometer



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางเคมีของดินตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

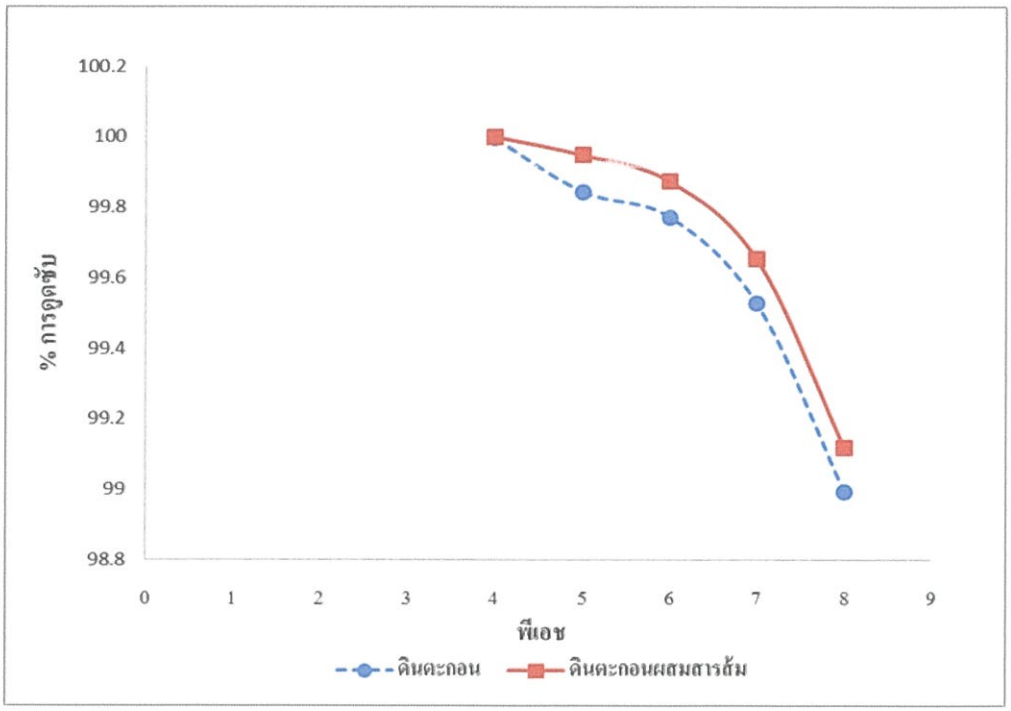
ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ดินตะกอนซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายฟอสเฟต โดยดินตะกอนที่ใช้ในการทดลอง มีค่าความชื้นเท่ากับ 7.35 % ลักษณะทางเคมีของทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่า พีเอช1:1 (ดิน:น้ำ)เท่ากับ 8.05±0.23, 6.48±0.23, 6.53±0.04 ตามลำดับ ค่า CEC เท่ากับ 0.63±0.00, 14.22±0.12, 17.73±0.12 ตามลำดับ ซึ่งทำการวิเคราะห์โดย กรณิกา ขวัญใจ และขวัญชัย (2556) และจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของตะกอนสารส้ม พบว่า ตะกอนสารส้มมีสีดำปนน้ำตาล เนื้อตะกอนมีความละเอียดมาก

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟต ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณของตัวดูดซับ(ดินตะกอนสารส้ม) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ เพื่อศึกษาไอโซเทอร์ม และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับในสารละลายฟอสเฟต โดยมีความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มเป็นตัวดูดซับ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.2.1 ผลของพีเอช

การทดลองนี้ ใช้สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออโธฟอสเฟต เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟต ตั้งแต่ 4, 5, 6, 7 และ 8 ด้วย กรดซัลฟิวริก 0.1 M และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ระยะเวลาการดูดซับ 18 ชั่วโมง โดยใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 2.0 กรัม ต่อปริมาตรสารละลายฟอสเฟต 50 มิลลิลิตร

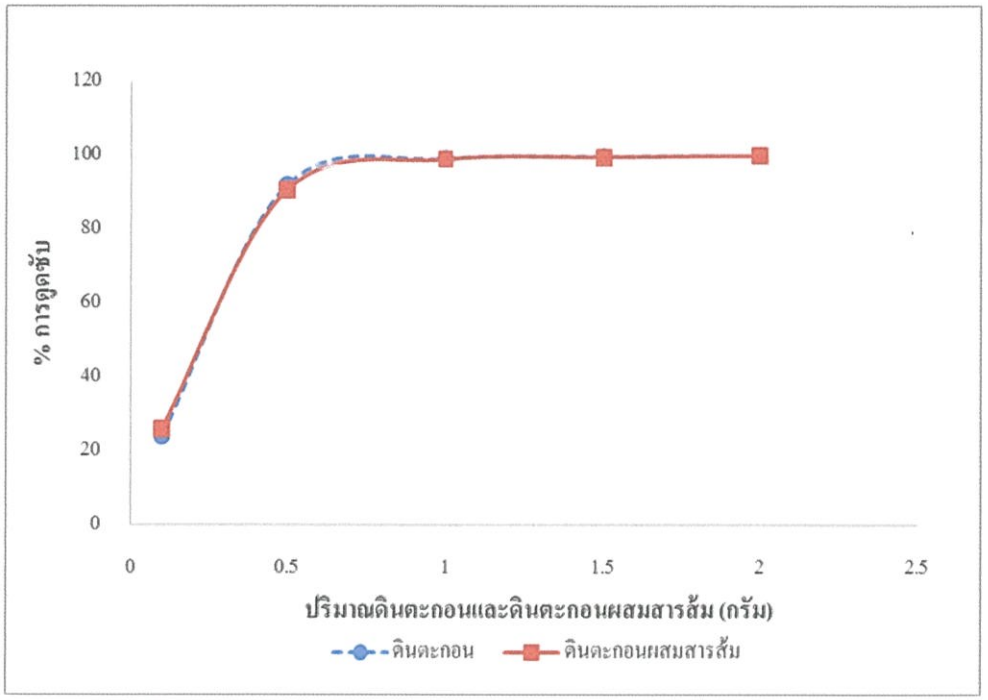


รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับออโธฟอสเฟตหลังการดูดซับด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มที่พีเอชต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่พีเอช 4 มีปริมาณออโธฟอสเฟตน้อยที่สุด แสดงว่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มดูดซับออโธฟอสเฟต คือ 4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 99.99 และ 100 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับออโธฟอสเฟตจะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่สภาวะสารละลายเป็นเบส ไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าไปล้อมรอบตะกอนสารส้ม ทำให้ฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบถูกผลักออก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Babatunde และ Zhao (ค.ศ. 2010) ส่วนทรายนั้นจะเห็นได้ว่ามีการดูดซับเพียงเล็กน้อยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ การดูดซับนี้อาจเกิดจากการดูดซับบนพื้นที่ผิวของทราย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.1 – ตารางที่ ข.3 ภาคผนวก ข.)

4.2.2 ผลของปริมาณดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

การทดลองนี้ใช้สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออโธฟอสเฟต เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มที่ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ต่อปริมาตรสารละลายฟอสเฟต 50 มิลลิลิตร และที่พีเอชเท่ากับ 4 และใช้เวลาในการดูดซับ 60 นาที

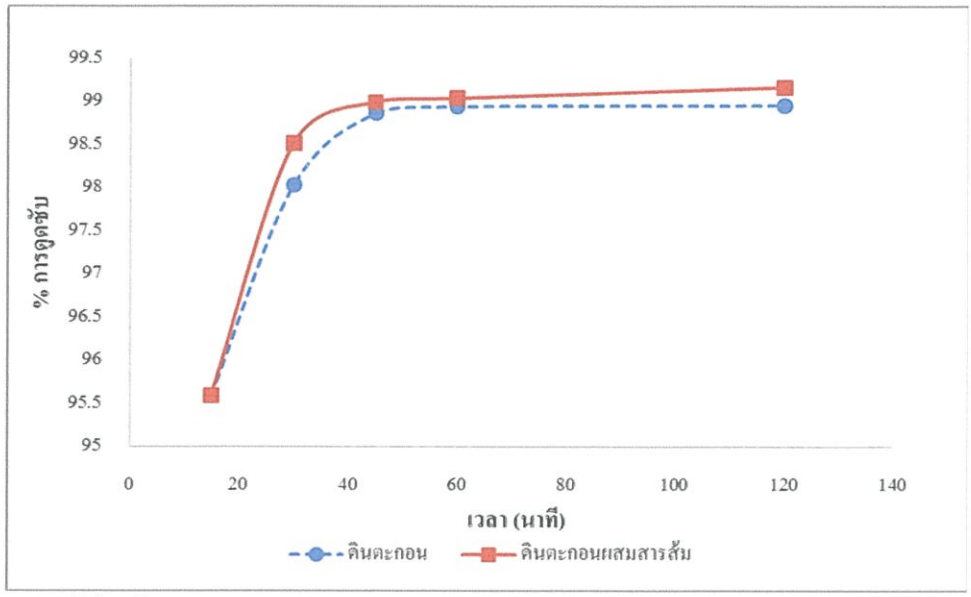


รูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับออโธฟอสเฟตหลังการดูดซับด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม เปอร์เซ็นต์การดูดซับฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ปริมาณ 1.0 กรัม ดังนั้น ปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม คือ 1.0 กรัม เปอร์เซ็นต์การดูดซับของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 98.81 และ 98.97 ตามลำดับ ส่วนทรายนั้นจะเห็นได้ว่ามีการดูดซับเพียงเล็กน้อยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการดูดซับนี้อาจเกิดจากการดูดซับบนพื้นที่ผิวของทราย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.4 – ตารางที่ ข.6 ภาคผนวก ข.)

4.2.3 ผลของระยะเวลา

การทดลองนี้ใช้สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออโธฟอสเฟต เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 1.0 กรัม ต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟต 50 มิลลิลิตร และที่พีเอชเท่ากับ 4 และใช้เวลาในการดูดซับที่ 15,30,45,60 และ 120 นาที



รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับออโธฟอสเฟตหลังการดูดซับด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าที่ระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 45 นาที ดังนั้น ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมกอนสารส้ม คือ 45 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 98.86 และ 98.99 ตามลำดับ ส่วนทรายนั้นจะเห็นได้ว่ามีการดูดซับเพียงเล็กน้อยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการดูดซับนี้อาจเกิดจากการดูดซับบนพื้นที่ผิวของทราย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.7 – ตารางที่ ข.9 ภาคผนวก ข.)

4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

จากการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟตโดยใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม 1.0 กรัม และความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตตั้งแต่ 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่สภาวะพีเอชเท่ากับ 4 ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองในสารละลายฟอสเฟต แล้วนำมากรองส่วนใส เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณของออโธฟอสเฟตที่เหลือจากการดูดซับ ได้ผลดังตารางที่ 4.1 แล้วนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับออโธฟอสเฟตตามสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และ ฟรุนดลิชไอโซ-เทอร์ม

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นออโธฟอสเฟตที่เริ่มต้นและที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มเป็นตัวดูดซับ

ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (กรัม)	ความเข้มข้นฟอสเฟต (mg/L)		
	ที่เริ่มต้น C_0	สภาวะสมดุล, C	
		ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
1.0	5.037	0.040	0.015
1.0	11.878	0.086	0.048
1.0	15.236	0.108	0.067
1.0	21.580	0.127	0.082
1.0	25.933	0.143	0.097
1.0	31.530	0.174	0.117
1.0	36.256	0.199	0.131
1.0	42.475	0.224	0.165
1.0	46.828	0.475	0.293
1.0	51.306	0.548	0.475

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการที่ 4. 1

$$q_e = q_m K_L C_e / 1 + K_L C_e \qquad (4.1)$$

เมื่อ q_e หมายถึง ปริมาณออโธฟอสเฟตที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_m หมายถึงการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e หมายถึง ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ K_L หมายถึง ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการที่ 4.1 สามารถจัดให้เป็นสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 4.2 หรือ 4. 3 ดังนี้

$$C_e/q_e = 1/q_m K_L + C_e/q_m \qquad (4.2)$$

หรือ

$$1/q_e = 1/q_m K_L (1/C_e) + 1/q_m \qquad (4.3)$$

เมื่อนำข้อมูลจากสมการที่ (4.3) มาเขียนกราฟระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/q_mK$ และจุดตัดในแกนแนวตั้งเท่ากับ $1/q_m$

สมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เขียนได้ ดังสมการที่ (4.4)

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (4.4)$$

เมื่อ K_f หมายถึงค่าคงที่ของฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม) และ n หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (ไม่มีหน่วย)

สมการที่ (4.4) สามารถจัดรูปให้อยู่ในลักษณะของสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้าง จะได้สมการที่ (4.5)

$$\log q_e = 1/n \log C_e + \log K_f \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.5) เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ที่มีความชันเท่ากับ 1/n และมีจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ $\log K_f$

ค่า $1/n = 1$ อธิบายถึงไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่า $1/n > 1$ อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และ ค่า $1/n < 1$ อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

การวิเคราะห์การดูดซับของออโธฟอสเฟต บนพื้นผิวของดินตะกอนสารส้มว่ามีพฤติกรรมแบบแลงเมียร์ หรือฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม ต้องระบุ ค่า K และ q_m (กรณีการดูดซับมีพฤติกรรมแบบแลง-เมียร์ไอโซเทอร์ม) หรือ ค่า K และค่า n (กรณีการดูดซับมีพฤติกรรมแบบฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม)

คำนวณ q เมื่อใช้ความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตในปริมาณต่างๆ กัน จากสมการที่ (4.6)

$$qW = V(C_0-C_e) \quad (4.6)$$

เมื่อ W หมายถึง น้ำหนักดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (กรัม) V หมายถึง ปริมาตรสารละลายฟอสเฟต (ลิตร) C_0 หมายถึง ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_e หมายถึง ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เช่น $w = 1$ g , $V = 50$ mL หรือ 0.05 L , $C_0 = 5.0373$ และ $C_e = 0.0402$ mg/L

$$q(1) = 0.05(5.0373 - 0.0402)$$

$$q = 0.2499 \text{ mg/g}$$

ค่า q ที่คำนวณได้ และข้อมูลที่ต้องการจะสอดคล้องกับสมการ การดูดซับของฟรุนดลิชจะต้องประกอบด้วย log q และ log C ส่วนสมการ การดูดซับของแลงเมียร์จะประกอบด้วย $1/q_e$ และ $1/C_e$ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออโธฟอสเฟต โดยใช้ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ดินตะกอน					ดินตะกอนผสมสารส้ม				
q_e (mg/g soil)	$1/C_e$	$1/q_e$	log C_e	log q_e	q_e (mg/g soil)	$1/C_e$	$1/q_e$	log C_e	log q_e
0.2499	24.876	4.002	-1.396	-0.602	0.251	65.189	3.982	-1.814	-0.600
0.5896	11.655	1.696	-1.067	-0.229	0.592	20.974	1.691	-1.322	0.228
0.7564	9.242	1.322	-0.966	-0.121	0.758	14.981	1.318	-1.176	-0.120
1.0726	7.856	0.932	-0.895	0.030	1.075	12.244	0.930	-1.088	0.031
1.2895	6.993	0.776	-0.845	0.110	1.292	10.264	0.774	-1.011	0.111
1.5678	5.757	0.638	-0.760	0.195	1.571	8.523	0.637	-0.931	0.196
1.8029	5.035	0.555	-0.702	0.256	1.806	7.657	0.554	-0.884	0.257
2.1126	4.474	0.473	-0.651	0.325	2.116	6.045	0.473	-0.781	0.325
2.3177	2.107	0.432	-0.324	0.365	2.327	3.412	0.430	-0.533	0.367
2.5379	1.826	0.394	-0.261	0.404	2.542	2.107	0.394	-0.324	0.405

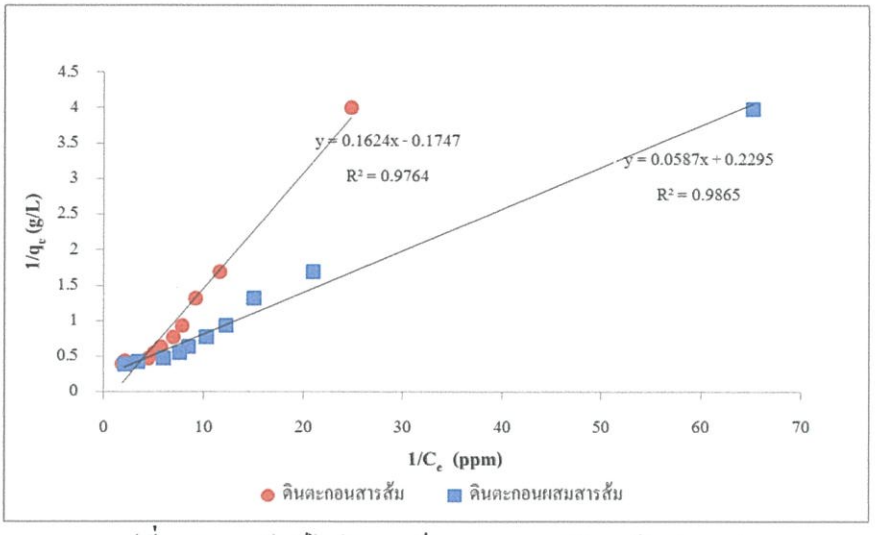
เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 มาเขียนกราฟระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ -0.175, 0.230 และจุดตัดในแกนแนวตั้งเท่ากับ 0.162, 0.059 สำหรับดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ตามลำดับ

ดินตะกอน จะได้ $1/q = -0.175 + 0.162\ (1/C)$

$R^2 = 0.9764$

ดินตะกอนผสมสารส้ม จะได้ $1/q = 0.230 + 0.059\ (1/C)$

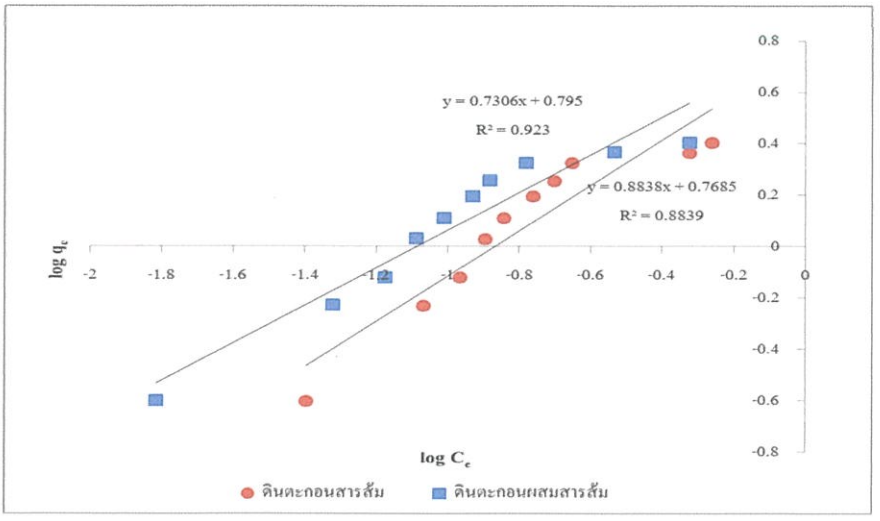
$R^2 = 0.9865$



รูปที่ 4.4 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับออโธฟอสเฟต
ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

และเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 มาเขียนกราฟระหว่าง log q และ log C จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ 0.769, 0.795 และจุดตัดในแกนแนวตั้งเท่ากับ 0.884, 0.730 สำหรับดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ตามลำดับ

ดินตะกอน	log q	=	0.769 + 0.884 log C
	R^2	=	0.8839
ดินตะกอนผสมสารส้ม	log q	=	0.795 + 0.730 log C
	R^2	=	0.923



รูปที่ 4.5 ฟรุนดลิชไอโซเทอมของการดูดซับออโธฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่และค่าความถูกต้องของชุดข้อมูลจากสมการฟรุนดิชและแลงเมียร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟต

ตัวดูดซับ	ฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม			แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม		
	K (mg/g)	1/n	R^2	q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2
ดินตะกอน	5.87	0.889	0.884	5.714	1.080	0.976
ดินตะกอนผสมสารส้ม	6.24	0.730	0.923	4.348	3.898	0.987

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับออโธฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนสารส้ม สามารถศึกษาในรูปของสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม ตามความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับสมการ โดยดูจากค่า R^2 ของสมการที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการทั้งสอง จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการแลงเมียร์ได้ดังรูปที่ 4.4 และสรุปค่าปริมาณการดูดซับออโธฟอสเฟตสูงสุดของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (q_m) และ b ไว้ดังตารางที่ 4.3 สำหรับสมการฟรุนดลิช สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.5 และสรุปค่าปริมาณการดูดซับ (K) และค่า Absorption intensity (1/n) ได้ดังตารางที่ 4.3 และจากตารางที่ 4.3 พบว่าการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ (R^2 = 0.976 และ 0.987) มากกว่าสมการฟลุนดลิช (R^2 = 0.884 และ 0.923) ดังนั้นการดูดซับออโธฟอสเฟต ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนสารส้มเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม อธิบายได้ว่า การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มีการซ้อนทับกัน หรือชั้นของตัวดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด พื้นที่ผิวในการดูดซับมีจำนวนจำกัด และมีกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นผิวของตัวดูดซับ และเมื่อดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้าย หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นผิวสัมผัส รวมทั้งไม่มีผลกระทบหรือแรงกระทำต่อกันและกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Babatunde และ Zhao (ค.ศ. 2010)

4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

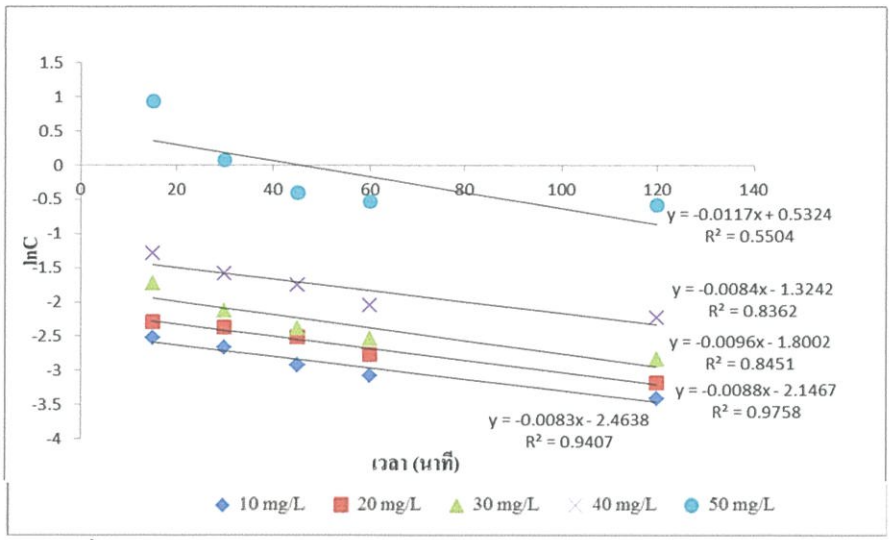
การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยา ของการดูดซับฟอสเฟตในสารละลาย ด้วยดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มโดยใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order

สมการของ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 4.7

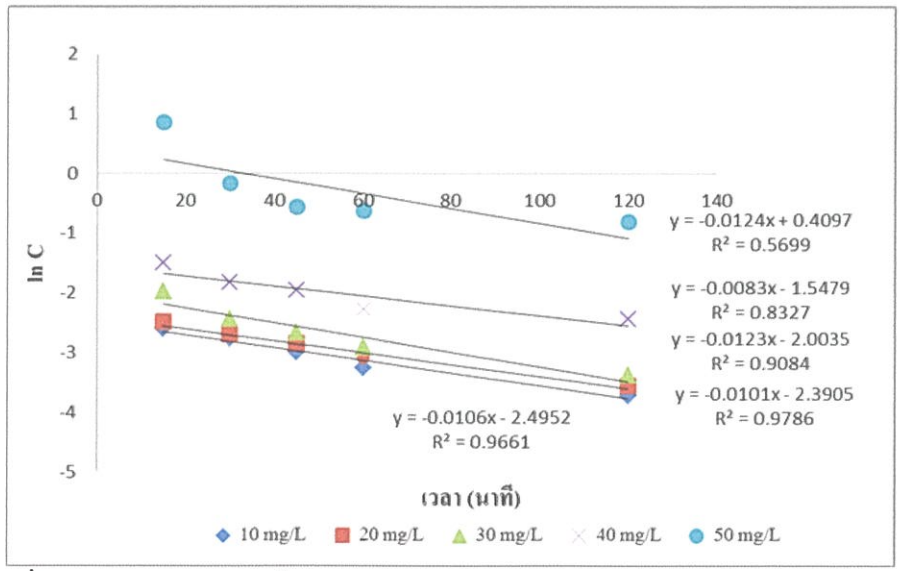
$$-dc / dt = k_1 C \quad (4.7)$$

อินทิเกรตสมการที่ 7 ที่สภาวะ หลังจากนั้นจัดให้ได้สมการเส้นตรงของ Pseudo- first order ดังสมการที่ 4.8

$$\ln c_t = \ln c_0 - k_1 t \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับออโธฟอสเฟสด้วยดินตะกอน



รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม

สมการ Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 4.9

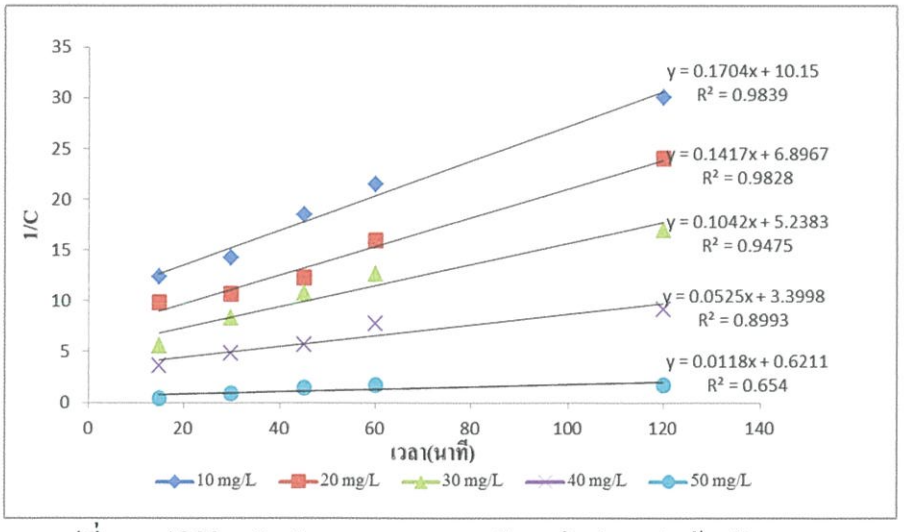
$$-dC_A / dt = kC_A^2 \quad (4.9)$$

อินทิเกรตสมการที่ 4.9 และจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงของ Pseudo-second order ดังสมการที่ 4.10

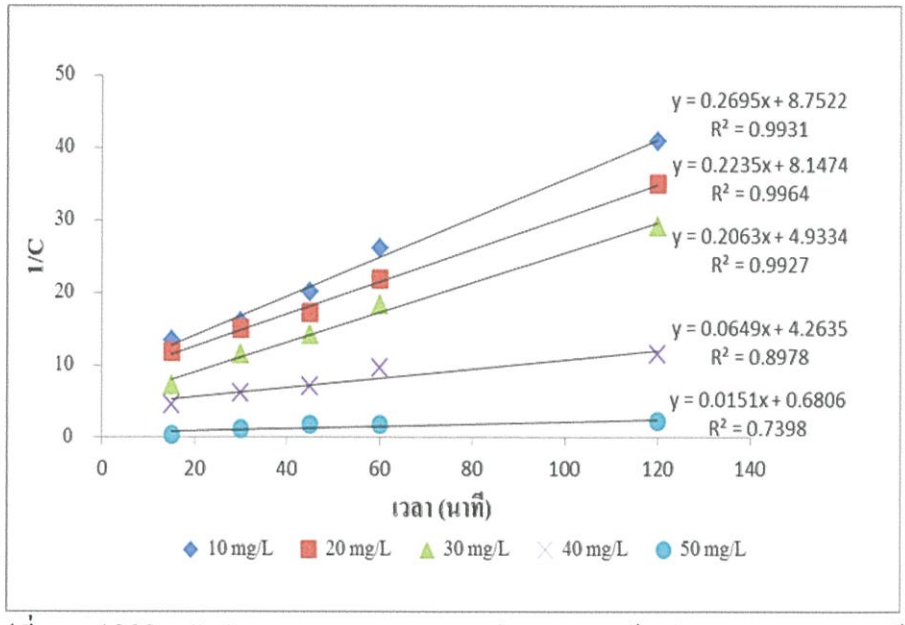
$$1 / c_t = 1 / C_0 + k_2 t \quad (4.10)$$

โดย k_2 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษา มาพลอตกราฟระหว่าง 1/C กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเป็น $1/C_0$ และจุดตัดแกนตั้งสามารถหาค่าคงที่ k_2 ของสมการ Pseudo-second order ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน



รูปที่ 4.9 ปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตของดินตะกอน และ ดินตะกอนผสมสารส้ม

ความเข้มข้น (mg/L)	ดินตะกอน				ดินตะกอนผสมสารส้ม			
	Pseudo-first order		Pseudo-second order		Pseudo-first order		Pseudo-second order	
	k_1	R^2	K_2	R^2	k_1	R^2	K_2	R^2
10	-0.0083	0.9407	0.1704	0.9839	-0.0106	0.9661	0.2695	0.9931
20	-0.0088	0.9758	0.1417	0.9828	-0.0101	0.9786	0.2235	0.9964
30	-0.0069	0.8451	0.1042	0.9475	-0.0123	0.9084	0.2063	0.9927
40	-0.0084	0.8362	0.0525	0.8993	-0.0083	0.8327	0.0649	0.8978
50	-0.0117	0.5504	0.0118	0.6540	-0.0124	0.5699	0.0151	0.7398

จากผลการทดลองพบว่า สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยเป็นการดูดซับแบบ chemical adsorption และมีค่าคงที่อัตราเร็ว (k) ดังตารางที่ 4.4

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยศึกษาการใช้ตะกอนสารส้มซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟต ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต ลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ และจลนศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟตในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม เท่ากับ 98.86 และ 99.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับออโธฟอสเฟตโดยดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม คือ ที่พีเอช 4 ปริมาณเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร และเวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 45 นาที

3. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟต พบว่า สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ ซึ่งดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่าปริมาณการดูดซับออโธฟอสเฟตสูงสุด เท่ากับ(q_m) 5.714 และ 4.348 mg/g และมีค่า b เท่ากับ 1.080 และ 3.898 ตามลำดับ สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นไปตาม Pseudo-second order

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและปริมาณ Al, Ca ในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

2. ควรศึกษาการดูดซับฟอสเฟตรูปอื่นๆด้วย เช่น โพลีฟอสเฟต กลีเซอโรฟอสเฟต ไพโร-ฟอสเฟต เป็นต้น เนื่องจากน้ำเสียชุมชนทั่วไป มีฟอสเฟตอยู่ในรูปต่างๆหลายรูป

3. ควรนำไปศึกษาการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชน

เอกสารอ้างอิง

การประปานครหลวง. 2556. **"กรรมวิธีผลิตน้ำประปา"**. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/main.php?filename=treat_water (วันที่ค้นข้อมูล: 20 ธันวาคม 2556)

การประปานครหลวง. 2556. **"โรงผลิตน้ำบางเขน"**. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/download/business/bkplant_th.pdf (วันที่ค้นข้อมูล: 20 ธันวาคม 2556)

เกษม พฤกษะวัน. 2548. **"เพิ่มคุณค่าให้กับตะกอนดิน...ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา"**. [Online]. Available: http://eco-town.dpim.go.th/article/detail.php?id=700 (วันที่ค้นข้อมูล: 15 มกราคม 2557)

กรณิกา ใจเขียว, ขวัญใจ ตระกูลดี และขวัญชัย พันทุกข์. 2556. **"รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในคอลัมน์ตะกอนสารส้มหลังจากผ่านการบำบัดน้ำเสีย"**. โครงงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ขนิษฐา เซะวิเศษ, จิตติมา โพนะตะ และนิสรา พนมพร. 2555. **"การกำจัดฟอสเฟตด้วยตะกอนสารส้ม"**. โครงงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชัยวัฒน์ วรพิบูลพงศ์. 2547. **"โครงการแนวคิด การทำวิจัยการใช้ตะกอนจากการผลิตน้ำประปาให้เป็นประโยชน์ในทางเศรษฐกิจ"**. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=469 (วันที่ค้นข้อมูล : 5 กุมภาพันธ์ 2557)

ชลอ จารุสุทธิรักษ์.2555. **หน่วยปฏิบัติการสำหรับเคมีสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 92-99.

เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. **"กระบวนการดูดซับ Adsorption process"**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 113-122.

พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และกรองแก้ว ทิพยศักดิ์. 2554. **ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อมสำหรับน้ำและน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2537. **วิศวกรรมประปา เล่ม1**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2557. **"เทคโนโลยีในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย"**. [Online]. Available: http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/3377/7/262454_ch1.pdf (วันที่ค้นข้อมูล : 15 กุมภาพันธ์ 2557)

ยะโก๊ะ ขาเร็มดาเบะ 2553. **"การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ"**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์. มหาวิทยาลัยทักษิณ. 33-47.

สุธน ธนพิทักษ์. 2545. **การกำจัดฟอสเฟตโดยใช้ตะกอนสารส้ม.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 8-12.

อัจจิมา ทวีกุล, อาภากร ฉัตรเทียนชัย และอารียา โมหมัดตาเฮต. 2556. **"การบำบัดไอออนฟอสเฟต และการชะละลายของไอออนในน้ำเสียด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์"**. โครงงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 3-7

อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์. 2554. **เคมีสิ่งแวดล้อมสำหรับน้ำและน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 89-105.

A.O. Babatunde., Y.Q.Zhao. 2010. Equilibrium and kinetic analysis of phosphorus from aqueous solution using waste alum sludge. **Journal of Hazadous Materials**. 184 : 746-752.

Sijia Gao., Changhui Wang., Yuansheng Pei. 2013. Comparison of different phosphate species adsorption by ferric and alum water treatment residuals. **Journal of Environmental Science**. 25(5): 986-992.

Yang, Y., Zhao, Y.Q., A.O. Babatunde., L. Wang., Ren, Y.X. and Y. Han. 2006. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. **Separation and Purification Technology**. 51: 193-200.

Yang, Y., Zhao, Y.Q., Kearny P. 2008. Influence of ageing on the structure and phosphate adsorption capacity of dewatered alum sludge. **Chemical Engineering Journal**. 145: 276-284.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก-1 วิธีการเตรียมดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

บดดินตะกอนที่แห้งด้วยเครื่องบดดิน ร่อนดินที่บดด้วยตะแกรงขนาด 0.08 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่างดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.08 มิลลิเมตร

สำหรับดินตะกอนผสมสารส้ม เตรียมได้โดยละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต เข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมกับดินตะกอนที่ผ่านการทำให้แห้งและบดแล้ว ในอัตราส่วนดินตะกอนต่อสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต 1.35: 1 โดยมวลต่อปริมาตร แช่ทิ้งไว้ 1 คืน นำไปทำให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลมจะได้ดินตะกอนผสมสารส้มที่มีสารส้มเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากนั้นนำมาหาค่าความชื้นของดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม โดยการนำดินมาชั่งโดยทราบน้ำหนัก ซึ่งเป็นน้ำหนักก่อนอบ และนำดินไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง และนำมาทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์ 2 ชั่วโมง นำไปดินไปชั่งหาน้ำหนักหลังอบ คำนวณหาค่าความชื้นของดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม

ก-2 วิธีการเตรียมสารละลายฟอสเฟต

ละลาย Anhydrous KH_2PO_4 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น และเจือจางให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร 1 มิลลิลิตร ของสารละลายนี้ เท่ากับ 50.0 µg PO_4-P

ก-3 วิธีการวิเคราะห์น้ำ

ก-3.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter)

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 ด้วย Standard buffer Solution pH 7 และ pH 4 โดยเทสารละลายลงบีกเกอร์ จุ่มหัววัดลงไปในสารละลาย แล้วทำตามขั้นตอนที่แนะนำสำหรับเครื่องวัดพีเอชแต่ละยี่ห้อ ขณะ Calibrate ควรแกว่งหัววัดเบาๆ

3. ล้างหัววัดด้วยน้ำกลั่น และซับให้แห้งก่อนวัดพีเอชทุกครั้ง

4. เทตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดลงบีกเกอร์ แล้วทำการวัดโดยแกว่งหัววัดเบาๆ

5. เมื่อค่าพีเอชหยุดนิ่งประมาณ 10 วินาที อ่านค่าที่วัดได้

6. ทำความสะอาดหัววัดแล้วเก็บให้เรียบร้อย

ก-3.2 การวิเคราะห์ออโธฟอสเฟต (Phosphate)

วิธี Ascorbic acid method

1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

เครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

2. สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล : เติม conc. H_2SO_4 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มิลลิลิตร

2. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต : ละลาย 1.3715 กรัม $K(SbO)C_4H_4O_6.1/2\ H_2O$ ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

3. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดท : ละลาย 20 กรัม $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดพลาสติกที่ 4°C

4. แอสคอร์บิคเอซิด 0.1 โมลาร์ : ละลาย 1.76 กรัม แอสคอร์บิคเอซิด ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะอยู่ตัวประมาณ 1 สัปดาห์ เก็บที่ 4°C

5. น้ำยารวม : ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 มิลลิลิตร น้ำยารวม ดังนี้

- 5 นอร์มอล H_2SO_4 50 มิลลิลิตร
- สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต 5 มิลลิลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดท และ 15 มิลลิลิตร
- กรดแอสคอร์บิค 30 มิลลิลิตร

ตั้งน้ำยาเหล่านี้ทิ้งไว้จนเท่าอุณหภูมิห้องจึงจะผสมกัน น้ำยารวมนี้อยู่ตัวได้ 4 ชั่วโมง

6. สารละลายสต็อคฟอสเฟต : ละลาย 219.5 mg ของ KH_2PO_4 (anhydrous) เติมน้ำกลั่นจนครบ 1000 มิลลิลิตร (1 มิลลิลิตร ของสารละลายนี้ = 50.0 µg PO_4-P)

7. สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต : นำสารละลายสต็อคฟอสเฟตมา 50.0 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (1 มิลลิลิตร = 2.5 µg PO_4-P)

3. วิธีการทดลอง

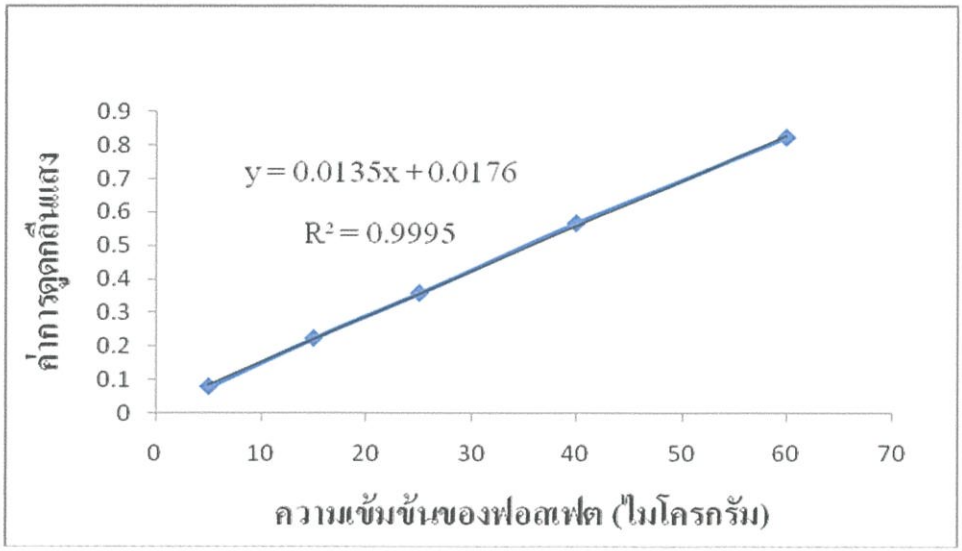
1. เตรียมกราฟมาตรฐาน เตรียมอนุกรมของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 2, 6, 10, 16 และ 24 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดที่กำหนด เขย่าให้เข้ากัน จะได้อนุกรมของฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0, 5, 15, 25, 40 และ 60 ไมโครกรัม หรือ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.2 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่าง ปิเปตตัวอย่าง 30.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ถ้าได้สีแดงให้หยด 5 N H_2SO_4 ลงไปทีละหยดจนกระทั่งสีแดงหายไป เติมน้ำยารวม 8.0 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดที่กำหนด เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที เพื่อให้เกิดสี แล้วอ่านค่าแอบซอร์บแบนซ์ โดยใช้สเปคโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

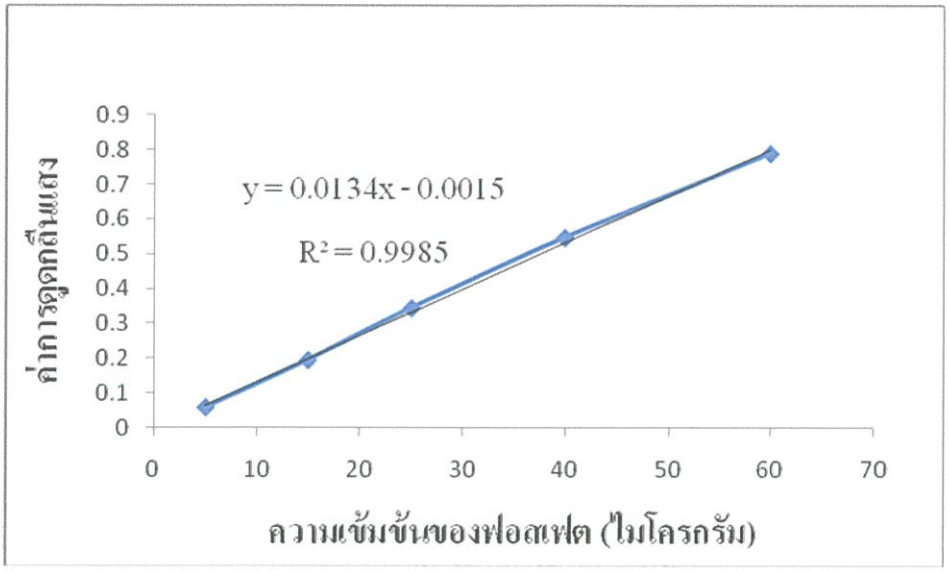
4. วิธีการคำนวณ

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

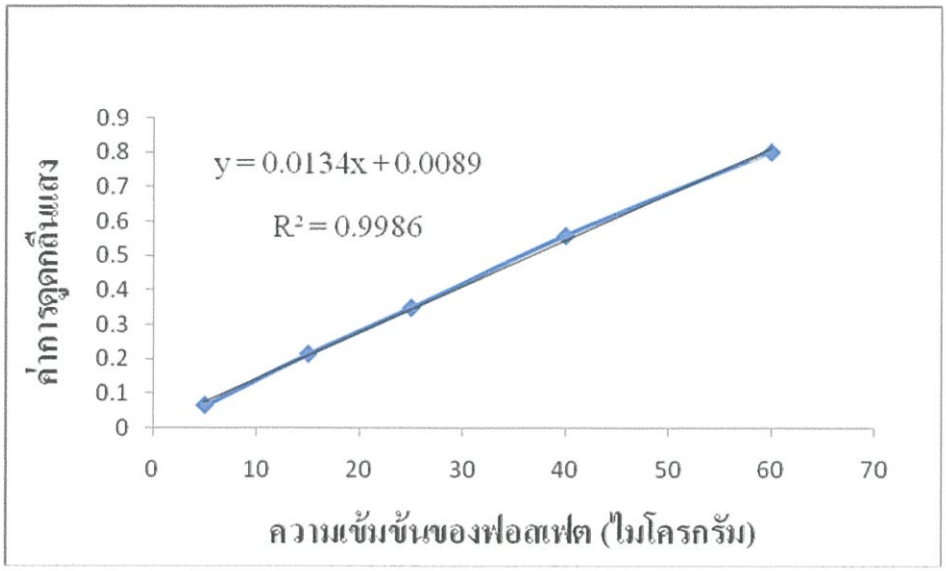
5. กราฟมาตรฐานฟอสเฟต



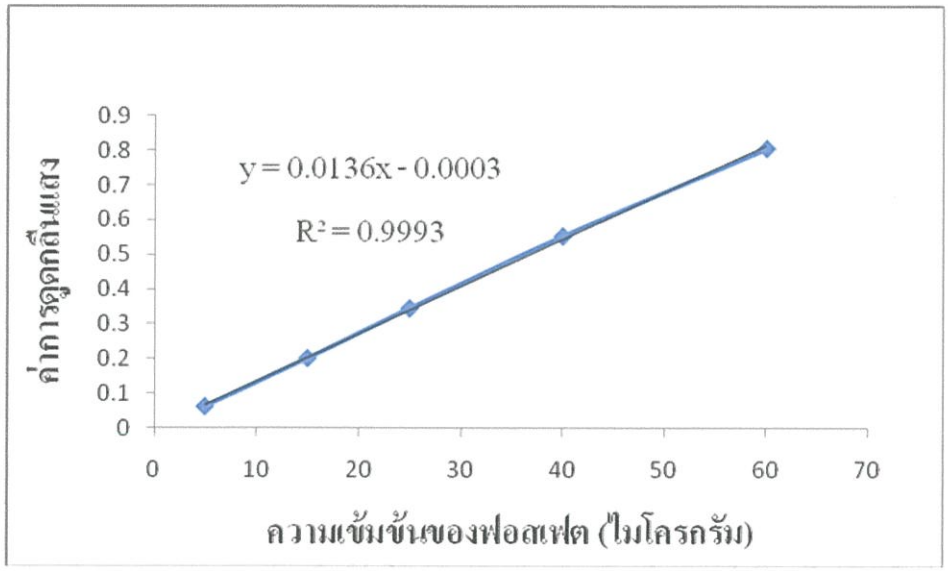
ครั้งที่ 1



ครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3



ครั้งที่ 4

รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตาราง ข.1 ผลการวิเคราะห์พีเอชที่เหมาะสม : ทราย (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.897 มิลลิกรัมต่อลิตร)

พีเอช	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
4	1	0.410	50	50.385	50.000	55.897	10.55	0.930
	2	0.414	50	50.897				
	3	0.397	50	48.718				
5	1	0.414	50	50.897	50.299	55.896	10.01	0.595
	2	0.411	50	50.513				
	3	0.403	50	49.487				
6	1	0.410	50	50.385	50.427	55.896	9.78	0.263
	2	0.413	50	50.769				
	3	0.408	50	50.128				
7	1	0.402	50	49.359	49.872	55.896	10.77	0.377
	2	0.409	50	50.256				
	3	0.407	50	50.000				
8	1	0.418	50	51.410	50.769	55.898	9.17	0.456
	2	0.411	50	50.513				
	3	0.410	50	50.385				

ตาราง ข.2 ผลการวิเคราะห์พีเอชที่เหมาะสม : ดินตะกอน (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.897 มิลลิกรัมต่อลิตร)

พีเอช	ชุดทดลอง				แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
			ที่ได้	เฉลี่ย			
4	1	0.017	<0.001	0.003	55.897	99.99	0.004
	2	0.020	0.008				
	3	0.017	<0.001				
5	1	0.057	0.103	0.087	55.896	99.84	0.014
	2	0.044	0.069				
	3	0.052	0.090				
6	1	0.067	0.128	0.127	55.896	99.77	0.003
	2	0.068	0.131				
	3	0.065	0.123				
7	1	0.122	0.269	0.264	55.896	99.53	0.017
	2	0.111	0.241				
	3	0.127	0.282				
8	1	0.237	0.564	0.563	55.896	98.99	0.003
	2	0.235	0.559				
	3	0.238	0.567				

ตาราง ข.3 ผลการวิเคราะห์พีเอชที่เหมาะสม : ดินตะกอนผสมสารส้ม (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.897 มิลลิกรัมต่อลิตร)

พีเอช	ชุดทดลอง				แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
			ที่ได้	เฉลี่ย			
4	1	0.017	<0.001	<0	55.897	100	0
	2	0.017	<0.001				
	3	0.017	<0.001				
5	1	0.026	0.023	0.029	55.896	99.95	0.004
	2	0.029	0.031				
	3	0.03	0.033				
6	1	0.038	0.054	0.071	55.896	99.87	0.015
	2	0.052	0.090				
	3	0.044	0.069				
7	1	0.079	0.159	0.194	55.896	99.65	0.070
	2	0.068	0.131				
	3	0.131	0.292				
8	1	0.216	0.510	0.493	55.896	99.12	0.050
	2	0.183	0.426				
	3	0.229	0.544				

ตาราง ข.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสม : ทราย (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.858 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ปริมาณ (กรัม)	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
0.1	1	0.413	50	50.261	50.220	55.858	10.09	0.155
	2	0.414	50	50.386				
	3	0.411	50	50.012				
0.5	1	0.409	50	49.764	49.722	55.858	10.98	0.256
	2	0.406	50	49.391				
	3	0.411	50	50.012				
1	1	0.415	50	50.510	50.759	55.858	9.13	0.203
	2	0.417	50	50.759				
	3	0.419	50	51.007				
1.5	1	0.412	50	50.137	50.261	55.858	10.02	0.868
	2	0.405	50	49.266				
	3	0.422	50	51.381				
2	1	0.423	50	51.505	50.966	55.858	8.76	0.458
	2	0.414	50	50.386				
	3	0.419	50	51.007				

ตาราง ข.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสม : ดินตะกอน (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.858 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ปริมาณ (กรัม)	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
0.1	1	0.662	25	40.616	41.362	55.858	25.95	1.055
	2	0.698	25	42.854				
	3	0.662	25	40.616				
0.5	1	0.32	5	3.869	5.242	55.858	90.62	0.974
	2	0.477	5	5.822				
	3	0.494	5	6.034				
1	1	0.263	-	0.632	0.662	55.858	98.81	0.042
	2	0.299	-	0.722				
	3	0.263	-	0.632				
1.5	1	0.138	-	0.321	0.300	55.858	99.46	0.051
	2	0.101	-	0.229				
	3	0.149	-	0.349				
2	1	0.039	-	0.075	0.086	55.858	99.85	0.008
	2	0.045	-	0.090				
	3	0.046	-	0.092				

ตาราง ข.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสม : ดินตะกอนผสมสารส้ม (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.858 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ปริมาณ (กรัม)	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
0.1	1	0.697	25	42.792	42.523	55.858	23.87	0.614
	2	0.702	25	43.103				
	3	0.679	25	41.673				
0.5	1	0.363	5	4.404	4.516	55.858	91.91	0.167
	2	0.362	5	4.392				
	3	0.391	5	4.752				
1	1	0.222	-	0.530	0.577	55.858	98.97	0.090
	2	0.291	-	0.702				
	3	0.209	-	0.498				
1.5	1	0.103	-	0.234	0.206	55.858	99.63	0.022
	2	0.081	-	0.179				
	3	0.091	-	0.204				
2	1	0.037	-	0.070	0.084	55.858	99.85	0.020
	2	0.054	-	0.112				
	3	0.037	-	0.070				

ตาราง ข.7 ผลการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสม : ทราย (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55.784 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
15	1	0.414	50	51.306	51.182	55.784	8.25	0.465
	2	0.408	50	50.560				
	3	0.417	50	51.679				
30	1	0.419	50	51.928	51.513	55.783	7.65	0.769
	2	0.421	50	52.177				
	3	0.407	50	50.435				
45	1	0.423	50	52.425	51.306	55.783	8.03	0.806
	2	0.411	50	50.933				
	3	0.408	50	50.560				
60	1	0.418	50	51.803	51.679	55.783	7.36	0.565
	2	0.422	50	52.301				
	3	0.411	50	50.933				
120	1	0.405	50	50.187	50.808	55.783	8.92	0.565
	2	0.416	50	51.555				
	3	0.409	50	50.684				

ตาราง ข.8 ผลการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสม : ดินตะกอน (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55. 784 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
15	1	0.195	5	2.407	2.461	55.784	95.59	0.052
	2	0.198	5	2.444				
	3	0.205	5	2.531				
30	1	0.449	-	1.113	1.099	55.783	98.03	0.253
	2	0.452	-	1.121				
	3	0.429	-	1.063				
45	1	0.261	-	0.646	0.634	55.783	98.86	0.010
	2	0.251	-	0.621				
	3	0.257	-	0.636				
60	1	0.247	-	0.611	0.591	55.783	98.94	0.015
	2	0.232	-	0.573				
	3	0.238	-	0.588				
120	1	0.234	-	0.578	0.582	55.783	98.96	0.002
	2	0.236	-	0.583				
	3	0.236	-	0.583				

ตาราง ข.9 ผลการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสม : ดินตะกอนผสมสารส้ม (ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น 55. 784 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	ชุดทดลอง					แบลงค์	% การดูดซับ	S.D.
	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	Dilution factor	ความเข้มข้น(mg P/L)		ความเข้มข้น (mg P/L)		
				ที่ได้	เฉลี่ย			
15	1	0.195	5	2.407	2.461	55.784	95.60	0.052
	2	0.198	5	2.444				
	3	0.205	5	2.531				
30	1	0.344	-	0.852	0.827	55.783	98.52	0.024
	2	0.337	-	0.835				
	3	0.321	-	0.795				
45	1	0.228	-	0.563	0.561	55.783	98.99	0.009
	2	0.231	-	0.571				
	3	0.222	-	0.549				
60	1	0.22	-	0.544	0.538	55.783	99.04	0.007
	2	0.219	-	0.541				
	3	0.214	-	0.529				
120	1	0.186	-	0.459	0.466	55.783	99.17	0.005
	2	0.191	-	0.471				
	3	0.189	-	0.466				

ตาราง ข.10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟต : ดินตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	S.D.
5	1	0.017	0.039	0.040	0.004
	2	0.016	0.036		
	3	0.020	0.046		
10	1	0.031	0.073	0.086	0.009
	2	0.040	0.096		
	3	0.037	0.088		
15	1	0.049	0.118	0.108	0.008
	2	0.045	0.108		
	3	0.041	0.098		
20	1	0.053	0.128	0.127	0.005
	2	0.050	0.121		
	3	0.055	0.133		
25	1	0.059	0.143	0.143	0.004
	2	0.061	0.148		
	3	0.057	0.138		

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	S.D.
30	1	0.075	0.183	0.174	0.007
	2	0.068	0.165		
	3	0.071	0.173		
35	1	0.080	0.195	0.199	0.006
	2	0.079	0.193		
	3	0.085	0.208		
40	1	0.09	0.220	0.223	0.007
	2	0.089	0.218		
	3	0.095	0.233		
45	1	0.191	0.471	0.475	0.012
	2	0.187	0.461		
	3	0.199	0.491		
50	1	0.220	0.544	0.548	0.008
	2	0.226	0.558		
	3	0.219	0.541		

ตาราง ข.11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟต : ดินตะกอนผสมสารส้ม

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	S.D
5	1	0.007	0.014	0.015	0.004
	2	0.010	0.021		
	3	0.006	0.011		
10	1	0.022	0.051	0.048	0.003
	2	0.021	0.049		
	3	0.019	0.044		
15	1	0.026	0.061	0.067	0.004
	2	0.030	0.071		
	3	0.029	0.068		
20	1	0.035	0.083	0.082	0.004
	2	0.032	0.076		
	3	0.036	0.086		
25	1	0.043	0.103	0.097	0.004
	2	0.040	0.096		
	3	0.039	0.093		

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	S.D.
30	1	0.049	0.118	0.117	0.007
	2	0.052	0.126		
	3	0.045	0.108		
35	1	0.054	0.131	0.131	0.010
	2	0.049	0.118		
	3	0.059	0.143		
40	1	0.064	0.155	0.165	0.007
	2	0.069	0.168		
	3	0.071	0.173		
45	1	0.112	0.275	0.293	0.014
	2	0.121	0.297		
	3	0.125	0.307		
50	1	0.189	0.466	0.475	0.007
	2	0.196	0.484		
	3	0.192	0.474		

ตาราง ข.12 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.036	0.076	0.080	0.004	-2.520	12.425
	2	0.039	0.082				
	3	0.040	0.084				
30	1	0.037	0.078	0.070	0.006	-2.658	14.271
	2	0.030	0.063				
	3	0.033	0.069				
45	1	0.027	0.057	0.054	0.003	-2.917	18.485
	2	0.024	0.051				
	3	0.026	0.055				
60	1	0.022	0.046	0.046	0.003	-3.069	21.525
	2	0.020	0.042				
	3	0.024	0.051				
120	1	0.016	0.034	0.033	0.003	-3.403	30.063
	2	0.014	0.030				
	3	0.017	0.036				

ตาราง ข.13 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.041	0.101	0.101	0.002	-2.290	9.879
	2	0.042	0.104				
	3	0.040	0.099				
30	1	0.037	0.091	0.094	0.002	-2.366	10.652
	2	0.039	0.096				
	3	0.038	0.094				
45	1	0.035	0.087	0.082	0.004	-2.506	12.252
	2	0.033	0.082				
	3	0.031	0.077				
60	1	0.027	0.067	0.063	0.003	-2.767	15.917
	2	0.025	0.062				
	3	0.024	0.060				
120	1	0.021	0.044	0.042	0.003	-3.180	24.040
	2	0.018	0.038				
	3	0.020	0.042				

ตาราง ข.14 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.069	0.170	0.179	0.007	-1.721	5.592
	2	0.076	0.187				
	3	0.073	0.180				
30	1	0.049	0.121	0.120	0.003	-2.120	8.332
	2	0.047	0.116				
	3	0.05	0.123				
45	1	0.036	0.089	0.093	0.003	-2.375	10.746
	2	0.039	0.096				
	3	0.038	0.094				
60	1	0.035	0.087	0.079	0.005	-2.536	12.632
	2	0.031	0.077				
	3	0.03	0.074				
120	1	0.024	0.060	0.059	0.005	-2.834	17.024
	2	0.026	0.064				
	3	0.021	0.052				

ตาราง ข.15 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.118	0.290	0.277	0.009	-1.284	3.612
	2	0.111	0.273				
	3	0.109	0.268				
30	1	0.079	0.194	0.205	0.008	-1.585	4.878
	2	0.084	0.207				
	3	0.087	0.214				
45	1	0.069	0.170	0.175	0.004	-1.744	5.722
	2	0.071	0.175				
	3	0.073	0.180				
60	1	0.052	0.128	0.129	0.007	-2.048	7.752
	2	0.049	0.121				
	3	0.056	0.138				
120	1	0.041	0.101	0.109	0.005	-2.220	9.210
	2	0.046	0.113				
	3	0.045	0.111				

ตาราง ข.16 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอน ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.205	2.516	2.565	0.036	0.942	0.390
	2	0.212	2.602				
	3	0.210	2.577				
30	1	0.439	1.077	1.083	0.006	0.080	0.923
	2	0.445	1.091				
	3	0.441	1.082				
45	1	0.295	0.724	0.674	0.036	-0.395	1.484
	2	0.268	0.658				
	3	0.261	0.640				
60	1	0.234	0.574	0.587	0.011	-0.534	1.705
	2	0.245	0.601				
	3	0.238	0.584				
120	1	0.232	0.569	0.560	0.008	-0.581	1.787
	2	0.224	0.550				
	3	0.228	0.560				

ตาราง ข.17 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.033	0.082	0.084	0.002	-2.476	11.896
	2	0.034	0.084				
	3	0.035	0.087				
30	1	0.029	0.072	0.067	0.003	-2.704	14.945
	2	0.026	0.064				
	3	0.026	0.064				
45	1	0.022	0.055	0.058	0.003	-2.849	17.264
	2	0.025	0.062				
	3	0.023	0.057				
60	1	0.017	0.042	0.046	0.003	-3.086	21.896
	2	0.020	0.050				
	3	0.018	0.045				
120	1	0.011	0.028	0.029	0.003	-3.557	35.071
	2	0.010	0.025				
	3	0.013	0.033				

ตาราง ข.18 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.033	0.082	0.084	0.002	-2.476	11.895
	2	0.034	0.084				
	3	0.035	0.087				
30	1	0.029	0.072	0.067	0.003	-2.704	14.945
	2	0.026	0.064				
	3	0.026	0.064				
45	1	0.022	0.055	0.058	0.003	-2.849	17.264
	2	0.025	0.062				
	3	0.023	0.057				
60	1	0.017	0.042	0.046	0.003	-3.086	21.896
	2	0.020	0.050				
	3	0.018	0.045				
120	1	0.011	0.028	0.029	0.003	-3.557	35.072
	2	0.010	0.025				
	3	0.013	0.033				

ตาราง ข.19 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.056	0.138	0.140	0.002	-1.969	7.162
	2	0.058	0.143				
	3	0.056	0.138				
30	1	0.038	0.094	0.087	0.005	-2.438	11.450
	2	0.033	0.082				
	3	0.035	0.087				
45	1	0.029	0.072	0.070	0.006	-2.657	14.249
	2	0.025	0.062				
	3	0.031	0.077				
60	1	0.020	0.050	0.055	0.004	-2.907	18.296
	2	0.024	0.060				
	3	0.022	0.055				
120	1	0.012	0.030	0.034	0.008	-3.375	29.212
	2	0.018	0.045				
	3	0.011	0.028				

ตาราง ข.20 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.090	0.221	0.222	0.006	-1.501	4.485
	2	0.088	0.216				
	3	0.094	0.231				
30	1	0.066	0.163	0.161	0.009	-1.822	6.185
	2	0.061	0.150				
	3	0.070	0.172				
45	1	0.054	0.133	0.141	0.006	-1.957	7.079
	2	0.058	0.143				
	3	0.060	0.148				
60	1	0.041	0.101	0.104	0.007	-2.266	9.645
	2	0.046	0.113				
	3	0.039	0.096				
120	1	0.036	0.0890	0.087	0.008	-2.438	11.450
	2	0.039	0.096				
	3	0.031	0.077				

ตาราง ข.21 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg P/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg P/L)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	lnC	1/C
15	1	0.196	2.406	2.353	0.038	0.855	0.425
	2	0.190	2.332				
	3	0.189	2.320				
30	1	0.347	0.851	0.847	0.011	-0.166	1.180
	2	0.35	0.859				
	3	0.339	0.832				
45	1	0.228	0.560	0.573	0.011	-0.556	1.744
	2	0.234	0.574				
	3	0.239	0.587				
60	1	0.220	0.540	0.532	0.006	-0.632	1.880
	2	0.216	0.530				
	3	0.214	0.525				
120	1	0.188	0.462	0.444	0.013	-0.811	2.250
	2	0.180	0.442				
	3	0.175	0.430				