รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

Phosphate Removal in Wastewater by Adsorption on Calcium Carbonate and Calcium Oxide from Eggshell

โดย

เสาวภา ไวยสุศรี

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
2558

DPU

ชื่อเรื่อง : การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่
ผู้วิจัย : เสาวภา ไวยสุศรี
สถาบัน : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ปีที่พิมพ์ : 2558
สถานที่พิมพ์ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
แหล่งที่เก็บรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
จำนวนหน้างานวิจัย : 86 หน้า
ลิขสิทธิ์ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ไก่และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผา ในการศึกษาการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ไก่ และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาวิเคราะห์หาปริมาณออโธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ เมื่อใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับ คือ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 เวลาในการดูดซับ 180 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัม โดยประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนการใช้ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับ พบว่า พีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4-11 เวลาในการดูดซับ 30 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 0.1 และ 0.5 กรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 97 การศึกษาไอโซเทอร์มของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับออโธฟอสเฟตสามารถวิเคราะห์และทำนายได้จากไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดิชและแลงเมียร์ ซึ่งในการใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชได้ดีกว่าแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลายชั้นหรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี ส่วนการใช้ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับจะสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก โดยการใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกันโดยประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 73 และ 99 เมื่อใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ไก่ และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับ การกำจัดฟอสเฟต เปลือกไข่ไก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับ

Title: Phosphate Removal in Wastewater by Adsorption on Calcium Carbonate
and Calcium Oxide from Eggshell
Researcher: Saowapa Waiyasusri
Institution: Dhurakij Pundit University
Year of Publication: 2015
Publisher: Dhurakij Pundit University
Sources: Dhurakij Pundit University
No. of page: 86 pages
Copyright: Dhurakij Pundit University

Abstract

This research was carried out in order to study the adsorption of phosphorus in form of orthophosphate on $CaCO_3$ from eggshell and CaO from burned eggshell. From the study focused on orthophosphate adsorption on $CaCO_3$ from eggshell and CaO from burned eggshell by ascorbic acid method. The optimum conditions for orthophosphate adsorption on $CaCO_3$ from eggshell were conducting in solution with operating initial pH 1 for a contact time of 180 minutes and adsorbent dosage of 2.0 g, the efficiency of orthophosphate adsorption was higher than 80%. While CaO from burned eggshell were conducting in solution with operating initial pH in the range of 4-11 for a contact time of 30 minutes and adsorbent dosage of 0.1 and 0.5 g, the efficiency of orthophosphate adsorption was higher than 97%. Moreover, the isotherm adsorption of adsorbents used for orthophosphate was measured and extrapolated using linear Freundlich and Langmuir isotherm. Isotherm of the $CaCO_3$ from eggshell showed better correlation to the Freundlich isotherm than the Langmuir isotherm. Which showed that adsorption was multi-layer adsorption or physicsorption rather than chemisorption. The Langmuir isotherm was the best correlated with CaO from burned eggshell, which indicated that adsorption was monolayer adsorption on a homogenous surface. In the study of orthophosphate removal from the wastewater from food industry and steel fabrication industry by using obtained optimum operation conditions. The results of the experiment were consistent with the synthetic sample. The percentage of orthophosphate adsorption was higher than 73% and 99 % when using $CaCO_3$ from eggshell and CaO from burned eggshell as an adsorbent respectively.

Keywords : Adsorption, Phosphate removal, Eggshell, Adsorption isotherm

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือของบุคคลและหน่วยงานจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ที่ได้กรุณาให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท จังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด และบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากการปนเปื้อนฟอสเฟต

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ที่อำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ใช้ในการทำวิจัย

หากงานวิจัยฉบับนี้ก่อให้เกิดคุณค่าและประโยชน์ประการใด ผู้วิจัยขอมอบแด่ บุพการี และครูอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนผู้วิจัย ด้วยความเคารพยิ่ง

เสาวภา ไวยสุศรี

DPU

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ฟอสฟอรัสและฟอสเฟต	6
2.2 เปลือกไข่	8
2.3 กระบวนการดูดซับ	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	23
3.2 สารเคมี	24
3.3 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์	24
3.4 การเตรียม $CaCO_3$ จากเปลือกไข่และ CaO จากเปลือกไข่เผา	27
3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และCaO จากเปลือกไข่เผา	28
3.6 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และCaO จากเปลือกไข่เผา	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ 30

บทที่ 4 ผลการวิจัย 31

4.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ 31

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา 34

4.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา 45

4.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ 53

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 55

5.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ 56

5.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา 56

5.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา 58

5.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา 59

5.5 ข้อเสนอแนะ 59

บรรณานุกรม 60

ภาคผนวก 63

ภาคผนวก ก การคำนวณผลการทดลอง 63

ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง 67

ภาคผนวก ค เครื่องมือและอุปกรณ์ 81

ประวัติย่อผู้วิจัย 85

DPU

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ 8

2-2 ธาตุและองค์ประกอบของเปลือกไข่และเปลือกไข่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 22

4-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร 31

4-2 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างหลังการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 33

4-3 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วย $CaCO_3$จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร 35

4-4 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วย CaO จากเปลือกไข่เผาในปริมาณต่างๆ ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร 38

4-5 ข้อมูลการทดลองการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตรด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซับ 3 ชั่วโมง 45

4-6 ข้อมูลการทดลองการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา โดยใช้ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที 46

4-7 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 2.0 กรัม ที่ pH เท่ากับ 1 46

4-8 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ CaO จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม ที่ pH เท่ากับ 7 47

4-9 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 2.0 กรัม ที่ pH เท่ากับ 1 47

4-10 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ CaO จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม ที่ pH เท่ากับ 7 47

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4-11 ข้อมูลค่าคงที่และความถูกต้องของข้อมูลจากสมการแลงเมียร์และฟรุนดิชในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่ และ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่เผา 52

4-12 ข้อมูลการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา และ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 54

4-13 ข้อมูลการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ โดยทำการปรับ pH ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ 55

ก-1 การคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดการวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟต 65

ก-2 การคำนวณเพื่อหาค่าสหสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟต 66

ข-1 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร 68

ข-2 ผลการทดลองแสดงปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ 69

ข-3 ผลการทดลองแสดงร้อยละออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ 71

ข-4 ผลการทดลองแสดงปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วย CaO จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่าง ๆ 73

ข-5 ผลการทดลองร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย CaO จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่าง ๆ 74

ข-6 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 75

ข-7 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา 76

ข-8 ผลการศึกษา pH เริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-9	ผลการศึกษา pH เริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา	78
ข-10	ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย CaO และ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับโดยไม่มีการปรับ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย	79
ข-11	ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับโดยปรับ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย	80

DPU

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 14

2-2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์ 15

2-3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ 16

2-4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดิช 17

2-5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดิช 18

4-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง 32

4-2 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-330 นาที 36

4-3 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-330 นาที 37

4-4 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วย CaO จากเปลือกไข่เผาในปริมาณต่างๆ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-60 นาที 39

4-5 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย CaO จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-60 นาที 40

4-6 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 2.0 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-300 นาที 41

4-7 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-60 นาที 41

4-8 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 2.0 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 180 นาที 43

4-9 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที 43

4-10 ฟรุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ pH เท่ากับ 1 48

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-11	ฟรุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา ที่ pH เท่ากับ 11	49
4-12	แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ ที่ pH เท่ากับ 1	50
4-13	แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา ที่ pH เท่ากับ 11	50
ก-1	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง	63
ค-1	เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	81
ค-2	เครื่อง HTS 1003 Hotplate Magnetic Stirrer	81
ค-3	ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ	82
ค-4	เตาเผา	82
ค-5	เตาอบไฟฟ้า	83
ค-6	อุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายสำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสง	83

DPU

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลพิษทางน้ำในปัจจุบันของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเจริญเติบโตในด้านต่างๆ ของประเทศ ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารตัวหนึ่งที่เป็นสาเหตุของปัญหามลพิษทางน้ำในปัจจุบัน กิจกรรมในด้านต่างๆ ที่เป็นสาเหตุของการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำ เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี อุตสาหกรรมชุบเคลือบ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้กิจกรรมจากการซักล้างในครัวเรือน การใช้ปุ๋ยเคมีจากภาคเกษตร การทำฟาร์มปศุสัตว์ ล้วนเป็นสาเหตุของการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสตามธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เมื่อมีการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำ ฟอสฟอรัสจะกลายเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืชน้ำ (Aquatic plants) สาหร่าย (Algae) และแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) ซึ่งจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น เรียกว่า “ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)” การแพร่กระจายปกคลุมผิวน้ำของผู้ผลิตเหล่านี้ทำให้แสงสว่างไม่สามารถส่องผ่านลงไปในน้ำได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง เมื่อผู้ผลิตเหล่านี้ตายลงจะเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำ เมื่อออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำหมดไป จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลายแทน ทำให้เกิดการเน่าเสีย

ปัญหาปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเกิดขึ้นมากในประเทศแถบสแกนดิเนเวีย เนื่องจากมีแหล่งน้ำปิดมาก เช่น อ่างเก็บน้ำ หนอง บึง หรือทะเลสาบ ซึ่งเป็นสิ่งที่เอื้อต่อการเกิดปรากฏการณ์นี้ เคยมีรายงานว่าค่าวิกฤตของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเท่ากับ 0.007-0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร หากเกินค่านี้แล้วสามารถเกิดปรากฏการณ์ “น้ำขึ้นน้ำลงสีแดง” หรือ “red tide” อันเป็นรูปแบบหนึ่งของยูโทรฟิเคชันได้ ในประเทศไทย พบปัญหายูโทรฟิเคชันหรือที่เรียก

กันว่า “ขี้ปลาวาฬ” เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ เช่น ศรีราชา ชะอำ หัวหิน กว๊านพะเยา บึงแก่นนคร และบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ดังนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมปริมาณของฟอสฟอรัสที่ระบายลงสู่แหล่งน้ำให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical Treatment Processes) การใช้กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Treatment Processes) และการใช้กระบวนการทางเคมี (Chemical Treatment Processes)

ข้อเสียของการใช้กระบวนการทางกายภาพคือจะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ส่วนการใช้กระบวนการทางชีวภาพจำเป็นต้องมีผู้ที่มีความรู้และความชำนาญเป็นพิเศษ และตะกอนที่ได้จากการกำจัดโดยกระบวนการทางชีวภาพจะปล่อยฟอสฟอรัสออกมา หากอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน การกำจัดฟอสฟอรัสโดยใช้กระบวนการทางเคมีนั้นจะเติมสารเคมีลงไปเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำ สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวตกตะกอน เช่น สารส้ม ($Al(SO_4)_3$) เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) หรือเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นต้น แต่ตะกอนที่ได้อาจมีสารพิษเจือปน (Thi An Hang Nguyen, .et.al, 2012) และการใช้ตัวตกตะกอนบางชนิดอาจมีค่าใช้จ่ายที่สูง

ในการเลือกใช้วิธีการบำบัดจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการบำบัด และความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่ใช้ รวมทั้งต้องมีราคาถูกคุ้มค่าต่อการบำบัด ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตที่อยู่ในน้ำทิ้งโดยการดูดซับบนแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ โดยทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุด ซึ่งเทคนิคการดูดซับจะมีข้อดีคือเป็นเทคนิคที่ออกแบบได้ง่าย สามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้ในปริมาณมากและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ (Elwakeel and Yousif, 2010) การนำวัสดุเหลือทิ้งได้แก่เปลือกไข่ไก่มาใช้เป็นตัวดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้ง นอกจากจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายไม่ต้องใช้ตัวดูดซับที่มีราคาแพงแล้วยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง อีกทั้งเป็นการช่วยจัดการของเสียและของเหลือทิ้งเหล่านี้อีกทางหนึ่ง ซึ่งในแต่ละปีจะมีปริมาณเปลือกไข่ที่ถูกทิ้งเป็นจำนวนมหาศาล โดยเฉพาะจากร้านอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาหารที่ต้องใช้ไข่ในกระบวนการผลิต หรือจากอุตสาหกรรมโรงฟักไก่ที่มีเปลือกไข่เหลือทิ้งในปริมาณที่สูงโดยต้องเสียค่าใช้จ่ายในการฝังกลบจำนวนมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

2. เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผามาเป็นใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent)

3. เพื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มระหว่าง Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยเปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา

4. เพื่อประยุกต์ใช้เปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การเตรียมตัวดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ และการประยุกต์นำตัวดูดซับที่เตรียมได้ใช้ดูดซับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทำการทดลองภายในห้องปฏิบัติการเคมี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

2. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต และ แคลเซียมออกไซด์ โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับและ pH เริ่มต้นที่ใช้ในการดูดซับ

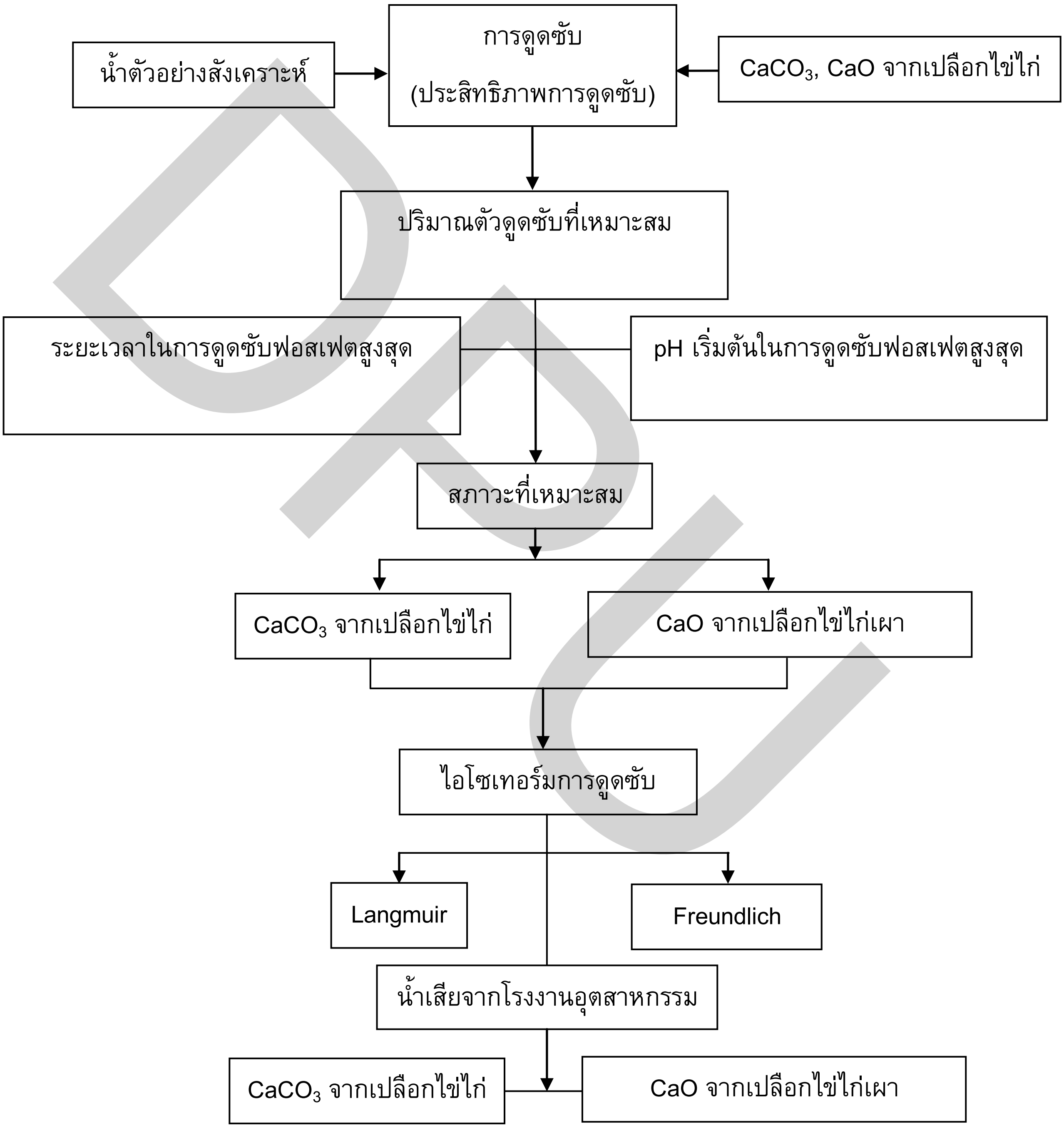
4. หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต โดยเทคนิคกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid Method) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)

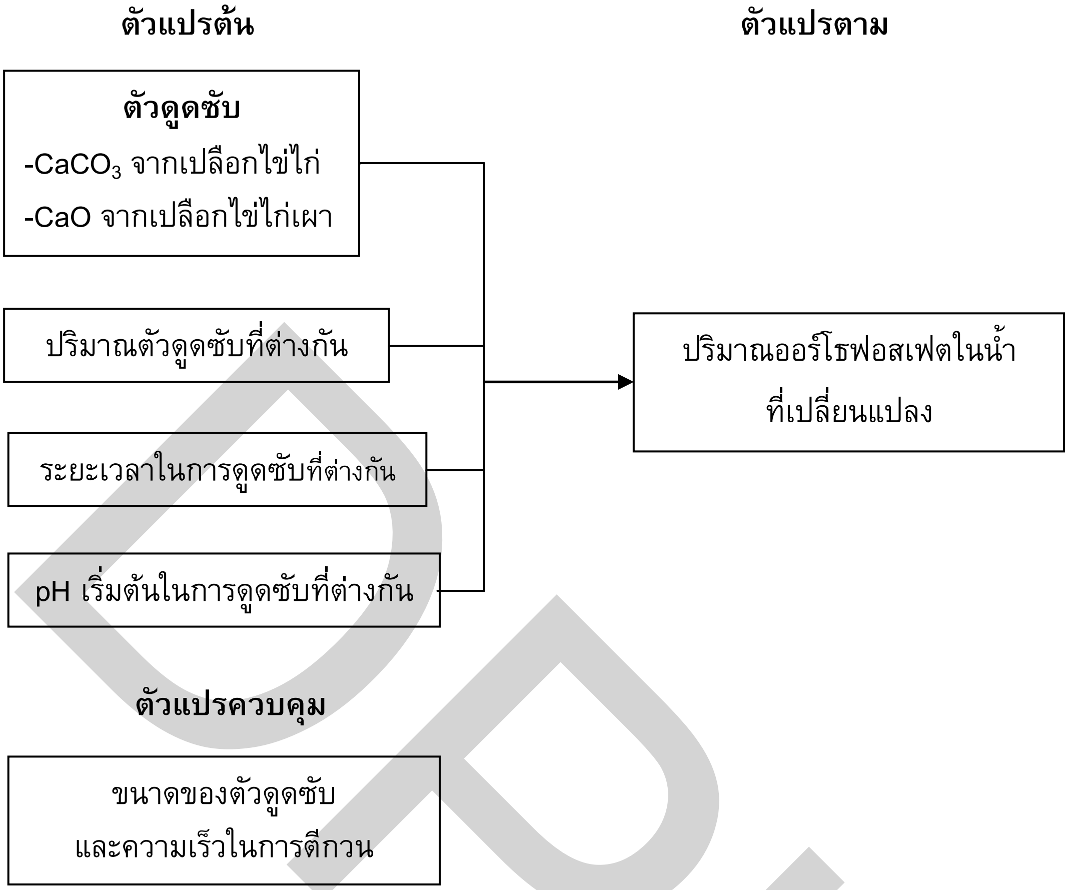
5. ศึกษาข้อมูลที่ได้ว่ามีความสอดคล้องกับกระบวนการดูดซับแบบใด คือ Langmuir Isotherm หรือ Freundlich Isotherm

6. ศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับ

1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

ในการวิจัยเรื่องการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดและตัวแปรในการวิจัย ดังนี้





1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตโดยกระบวนการดูดซับ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาฟอสฟอรัสปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

2. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตโดยใช้กระบวนการดูดซับ

3. สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมี

4. สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ ต่อไปได้

5. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ ไปใช้ในการพัฒนาผลิตอุปกรณ์บำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ได้

DPU

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟอสฟอรัสและฟอสเฟต (Phosphorus and Phosphate)

ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและในน้ำทิ้งจะอยู่ในรูปต่างๆ กันของฟอสเฟต เช่น ออร์โธฟอสเฟต อินทรีย์ฟอสเฟต หรือคอนเดนส์ฟอสเฟต เป็นต้น ฟอสเฟตเหล่านี้ถูกปนเปื้อนในธรรมชาติได้หลายทางเนื่องจากกิจกรรม เช่น การเติมลงไปในน้ำประปา เพื่อป้องกันการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตภายหลัง การซักฟอกหรือล้างภาชนะซึ่งใช้ผงซักฟอกในรูปของฟอสเฟตและโพลีฟอสเฟต จากกิจกรรมทางการเกษตรซึ่งใช้ปุ๋ยเคมีในรูปของออร์โธฟอสเฟต เป็นต้น

2.1.1 ประเภทของสารประกอบฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัสที่พบในน้ำ มี 3 ประเภท ดังนี้ (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2544)

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Reactive Phosphorus) ได้แก่ ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) โมโนโซเดียมฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ($(NH_4)_2HPO_4$)

2. คอนเดนส์ฟอสเฟต (Condentphosphate) หรือ โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำทิ้งจากบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาดเมื่อแตกตัวจะให้ออร์โธฟอสเฟตออกมา ได้แก่ โซเดียมเฮกซาเมตาฟอสเฟต ($Na_3(PO_4)_6$) โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ($Na_5P_3O_{10}$) และ เตระโพลีฟอสเฟต ($Na_4P_2O_7$) คอนเดนส์ฟอสเฟตเป็น Dehydrate Phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลส์ในน้ำกลับไปเป็นออร์โธฟอสเฟตตามเดิม อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพีเอชที่ต่ำ และจะเกิดในน้ำสกปรกรวดเร็วกว่าน้ำบริสุทธิ์

3. อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphate) ได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดนิวคลีอิค (Nucleic Acid) ฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) น้ำตาลฟอสเฟต (Sugar Phosphate)

2.1.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต

ฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตอาจหาได้โดยวิธี Gravimetric หรือ Volumetric หรือ Colorimetric สำหรับวิธี Gravimetric เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีฟอสเฟตอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนวิธี Volumetric ใช้เมื่อมีฟอสเฟตอยู่ในความเข้มข้นสูงกว่า 50 มิลลิลิตรต่อลิตร ซึ่งพบมากในหม้อต้มน้ำ (Boiler) ซึ่งจะเติมฟอสเฟตลงไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกรันซึ่งอาจทำให้หม้อน้ำเกิดการระเบิดได้ เนื่องจากวิธีนี้ทำให้ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงนิยมใช้วิธี Colorimetric

วิธี Colorimetric ที่ใช้หาปริมาณฟอสเฟตมี 3 วิธี คือ

1. Vanadomolybdophosphoric acid
2. Stannous Chloride
3. Ascorbic Acid

ทั้งสามวิธีมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงตัวลดออกซิเจนที่ใช้ทำให้เกิดสีในขั้นตอนสุดท้าย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ฟอสเฟตจะรวมตัวกับแอมโมเนียมโมลิบเดทภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเกิดเป็นแอมโมเนียมฟอสโฟโมลิบเดท ซึ่งเป็นสาร Complex ดังสมการที่ 2-1

$$PO_4^{3-} + 12(NH_4)_2MoO_4 + 24H^+ \rightarrow (NH_4)_3PO_4.12MoO_3 + 21NH_4 + 12H_2O \qquad 2\text{-}1$$

เมื่อมีฟอสเฟตในน้ำเป็นจำนวนมากจะเกิดเป็นตะกอนสีเหลืองของ Phosphomolybdate ซึ่งกรองออกได้และใช้ในการหาวิธี Volumetric ในความเข้มข้นต่ำๆ จะได้เป็น colloidal สีเหลือง ซึ่งถือว่าเป็นความเข้มข้นปานกลางใช้วัดโดยวิธี Colorimetric ได้เลย ถ้าฟอสเฟตมีอยู่น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบเป็นส่วนใหญ่ในการวิเคราะห์น้ำ สีเหลืองของคอลลอยด์จะไม่ปรากฏชัด จึงต้องใช้ตัวลดออกซิเจนไปทำให้เกิดสีซึ่งสามารถวัดได้ สารที่นิยมใช้คือสแตนนัสคลอไรด์หรือกรดแอสคอร์บิกตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งสารนี้จะไปรีดิวซ์ Molybdenum ใน แอมโมเนียมโมลิบเดทเกิดเป็นสารสีน้ำเงิน สีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับปริมาณฟอสเฟตในน้ำ โดยที่ปริมาณแอมโมเนียมโมลิบเดทที่เกินพอจะไม่ถูกรีดิวซ์และไม่ขัดขวางการวิเคราะห์ สารที่มีสีที่เกิดขึ้นยังแยกไม่ได้จึงไม่ทราบสูตรที่แน่นอน เรียกกันว่า Molybdenum Blue หรือ Heteropoly Blue ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวลดออกซิเจนเป็นดังสมการที่ 2-2

$$(NH_4)_3PO_4.12MoO_3 + Sn^{2+} \longrightarrow \text{(molybdenum blue)} + Sn^{4+} \qquad 2\text{-}2$$

2.2 เปลือกไข่

เปลือกไข่มีหน้าที่รองรับน้ำหนักของแม่ไก่ขณะกกฟักไข่เป็นทางให้อากาศผ่านเข้าออก ป้องกันการกระทบกระเทือนและไม่ให้เชื้อจุลินทรีย์จากภายนอกเข้าไปทำลายเชื้อลูกไก่ แต่ต้องโปร่งบางพอให้ลูกไก่เจาะออกไปได้ (ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์, 2544) โดยไข่ทั้งฟองของสัตว์ปีกต่างๆ รวมทั้งเป็ด ไก่ มีองค์ประกอบและโครงสร้างเหมือนกัน แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ไข่แดง ไข่ขาว และเปลือกไข่ แต่สัดส่วนและปริมาณต่างกันตามขนาดและชนิดของสัตว์ปีก โดยไข่ไก่ฟองหนึ่งน้ำหนักเฉลี่ย 58 กรัม แบ่งเป็นไข่ขาว ไข่แดงและเปลือก เท่ากับ 32.9, 18.7 และ6.4 กรัมต่อฟอง ตามลำดับ ไข่ขาวและไข่แดงนำ ไปใช้ประโยชน์ คิดเป็นร้อยละ 89 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง ส่วนเหลือทิ้งอีกร้อยละ 11 เป็นเปลือกไข่ ที่ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ร้อยละ 94 แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) ร้อยละ 1 แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ร้อยละ 1 และอินทรีย์สาร ร้อยละ 4 ของน้ำหนักเปลือกแห้ง

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ (วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์, 2555)

แร่ธาตุ	% โดยน้ำหนัก		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
$CaCO_3$	99.0	96.5	97.3
S	0.1	1.2	0.4
Mg	0.5	0.1	1.0
P	0.2	0.5	1.1
K	-	0.0839	-

2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของเปลือกไข่ (ยุวรัตน์, 2544)

1. ส่วนเคลือบผิวไข่ (Cuticle) เป็นชั้นที่อยู่บนผิวนอกของเปลือกไข่ หนาประมาณ 0.5-12.8 ไมโครเมตร เมื่อขยายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน จะปรากฏรอยแยกจำนวนมากบนพื้นผิว เพราะเคลือบผิวไข่มีหน้าที่ อุดรูพรุนที่ผิวด้านนอกป้องกันการสูญเสียน้ำและการบุกรุกของจุลินทรีย์ ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 85-87 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3.5-4.4 ไขมันร้อยละ 2.5-3.5 และเถ้าร้อยละ 3.5 ทั้งหมดประกอบกันเป็นอินทรีย์สารทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร นอกจากนี้บนชั้นเคลือบผิวไข่ ยังพบเม็ดสี (Pigment) ที่เกิดจากวัตถุสีของเม็ดเลือดแดง (Porphyrin) กระจายอยู่จำนวนมาก ซึ่งเม็ดสีเหล่านี้จะปะปนกับ

เกลือแคลเซียมและเยื่อเปลือกไข่ด้วย แต่ปริมาณการกระจายจะลดลงจากชั้นเคลือบผิวไข่ลงมา ทำให้เปลือกไข่ชั้นนอกมีเม็ดสีมากกว่าเปลือกไข่ชั้นในและเยื่อเปลือกไข่

2. เปลือกไข่ชั้นนอก (Spongy Layer) เป็นชั้นที่แคลเซียมคาร์บอเนตเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในรูปของผลึก Calcite และจัดเรียงตัวตามแนวตั้งอยู่บนเมตริกซ์อินทรีย์ (Organic Matrix) ซึ่งเป็นสารพวก Protein Acid Mucopolysaccharide Complex ที่ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 70 พอลีแซคคาไรด์ประมาณร้อยละ 11 ที่แบ่งเป็น Chondroitin Sulphate A และB ประมาณร้อยละ 35 และกรดยูโรนิก ในรูปกรดไฮยาลูโรนิก ประมาณร้อยละ 20 โดยองค์ประกอบเหล่านี้ ทำ ให้เมตริกซ์อินทรีย์ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH), หมู่เอมีน (NH_3) และหมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) ที่สามารถจับไอออนของโลหะหนักได้ (Chelating Ions) เช่น เมตริกซ์อินทรีย์ของไข่ไก่จับไอออนเหล็กด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ที่พบมากใน Mucopolysaccharide ของเยื่อเปลือกไข่ โดยปกติเมตริกซ์อินทรีย์จะประกอบกันเป็นเส้นใยละเอียด (Finefibrils) หนา 0.01 ไมโครเมตร ยาว 10 ไมโครเมตร ขนานไปกับผิวเปลือก พบกระจายอยู่ทั่วทั้งเปลือก แต่จะพบมากที่ด้านใน (ใกล้กับส่วน Mammilary Core หรือส่วนเยื่อเปลือกไข่) ประมาณ 2/3 ของเมตริกซ์ทั้งหมด และจะน้อยลดหลั่นกันออกมาจนถึงชั้นนอก ซึ่งมีเส้นใยเมตริกซ์น้อยที่สุด เปลือกไข่ชั้นนอกมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ เพราะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากตั้งแต่ 7,000-17,000 รู ที่เชื่อมโยงจากผิวนอกเข้าไปถึงเยื่อเปลือกไข่ เพื่อเป็นทางผ่านของอากาศ โดยที่แต่ละบริเวณของเปลือกไข่จะมีจำนวนรูต่อตารางเซนติเมตรไม่เท่ากัน คือ ด้านป้าน ด้านกลาง และด้านแหลม มีจำนวนรูเท่ากับ 125.6, 106.1-113.4 และ73.7 รูต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และขนาดของรูขนาดใหญ่ เท่ากับ 0.022-0.029 มิลลิเมตร รูขนาดเล็กเท่ากับ 0.0038-0.0054 มิลลิเมตร

3. เปลือกไข่ชั้นใน (Mammillary Knob Layer) เป็นปุ่มครึ่งทรงกลมของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตรูป 6 เหลี่ยม (Hexagonal Plates) สูง 1/3 ของความหนาเปลือกไข่ ภายในมี Mammillary Core ซึ่งเป็นมวลสารอินทรีย์ขนาดเล็กและเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างผลึกที่เรียกว่า Seeding Sites ประกอบด้วย Protein Acid Mucopolysaccharide Complex ที่มี Neutral Sugar และ Neutral Mucopolysaccharide ถูกล้อมรอบด้วย Sialomucin ซึ่งเป็นสารที่มีกรดอ่อน และ Mammillary Core ยังจับแน่นกับชั้นเยื่อเปลือกไข่ ด้วยการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนกับเส้นใยของเยื่อเปลือกไข่ชั้นนอก

4. เยื่อเปลือกไข่ (Shell Membrane) เป็นชั้นบาง 2 ชั้นแนบติดกันโดยตลอด ยกเว้นด้านป้านของไข่ที่ถูกแยกกันด้วยช่องอากาศ (Air Sac) หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร ประกอบด้วยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันร้อยละ 95, 2 และ 3 ตามลำดับ (ไม่คิดปริมาณเถ้า) หรือคิดรวมปริมาณเถ้า ซึ่งประกอบด้วย ฟอสฟอรัส แคลเซียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม สังกะสี แมงกานีส เหล็ก ทองแดง โบรอน และอลูมิเนียม อีกร้อยละประมาณ 2 โดยเยื่อเปลือกไข่แต่ละชั้นประกอบด้วย เส้นใยโปรตีนเคราติน, อิลาสติน และคอลลาเจน เชื่อมต่อกัน แล้วถูกห่อหุ้มด้วยชั้น Mucopolysaccharide หนาประมาณ 0.5 ไมโครเมตร แบ่งย่อยได้เป็น 2 ชั้น คือ เยื่อเปลือกไข่ชั้นนอก (Outer Shell Membranes) อยู่ติดกับส่วน True Shell จึงมีเส้นใยบางส่วนยื่นเข้าไปในส่วนฐานของเปลือกไข่ชั้นใน แล้วรวมตัวเป็น Mammillary Core เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 3 ไมโครเมตร เฉลี่ย 1.3 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 15 ไมโครเมตร เยื่อเปลือกไข่ชั้นใน (Inner Shell Membranes) มีผิวเรียบ บาง หนาประมาณ 2.7 ไมโครเมตร เส้นใยยาวมากกว่า 23 ไมโครเมตร เพราะปลายเส้นใยที่เรียวแหลมสามารถซ้อนเกย (Overlap) รวมกับเส้นใยใกล้เคียงภายใต้ชั้นห่อหุ้มเดียวกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุดเท่ากับ 1.5 ไมโครเมตร เฉลี่ย 0.9 ไมโครเมตร เป็นชั้นที่แยกไข่ขาวออกจากส่วนของเปลือกเรียกว่า "Limiting Membrane" ทั้ง 2 ชั้น มีรูพรุนที่ผิวจำนวนมาก เพื่อเป็นทางผ่านของอากาศ โดยเยื่อชั้นในมีรูพรุนมากกว่าเยื่อชั้นนอก

2.2.2 การใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่

เปลือกไข่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ที่ผ่านมามีการนำเปลือกไข่ไปใช้ทำปุ๋ย หรือใช้ไล่มดเนื่องจากมีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เปลือกไข่บดมีแคลเซียมสูงสามารถใช้ปรับสภาพดินที่เป็นกรดให้เป็นกลางมากขึ้นได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้เปลือกไข่บดเป็นตัวดูดซับโลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมี่ยมและตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในดินหรือดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ใช้ปรับพีเอชของน้ำเสียแทนการใช้ปูนขาวและใช้เป็นสารช่วยทำให้เกิดการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย ในทางโภชนาการเปลือกไข่บดใช้ผสมในอาหารเพื่อเสริมแคลเซียม เช่น ผสมเปลือกไข่บดในผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบ และใช้เป็นแหล่งแคลเซียมเสริมในอาหารสัตว์

2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่สารดูดซับได้ดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งซึ่งมีผิวเป็นที่เกาะจับ เรียกส่วนของแข็งนี้ว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็งและพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (นิพนธ์และคณิตา, 2555)

2.3.1 ประเภทการดูดซับ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical Adsorption หรือ Van Der Waals Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ เป็นแรงดูดที่ค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับเกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี มีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ ทำให้การดูดซับ

ทางเคมีส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

2.3.2 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกากัมมันต์ อะลูมิเนียมกัมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับอนินทรีย์จะมีพื้นผิวที่จำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด

2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์

3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

4. วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ เถ้าแกลบดำ

5. สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือรา สายพันธ์ต่างๆ และสาหร่าย

2.3.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดัน หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับโดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอร์ม (Isotherm)” ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC

โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่า เป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

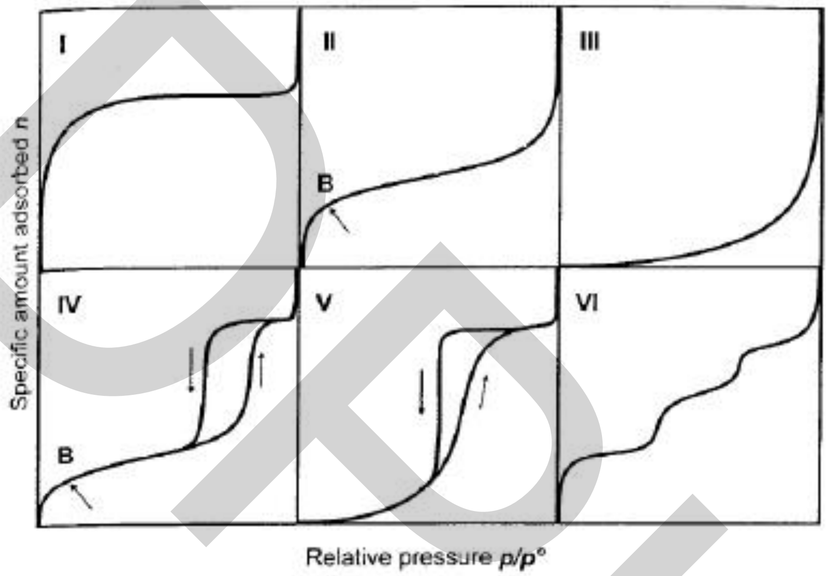
Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee Ofisotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้าไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็ง ที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำแต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis Loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ในของแข็ง ที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis Loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนักโดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



ภาพที่ 2-1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

2.3.3.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932 (นิพนธ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2555)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous Adsorption Surface) มีกลไกของการดูซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากสุด)

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการที่ 2-1

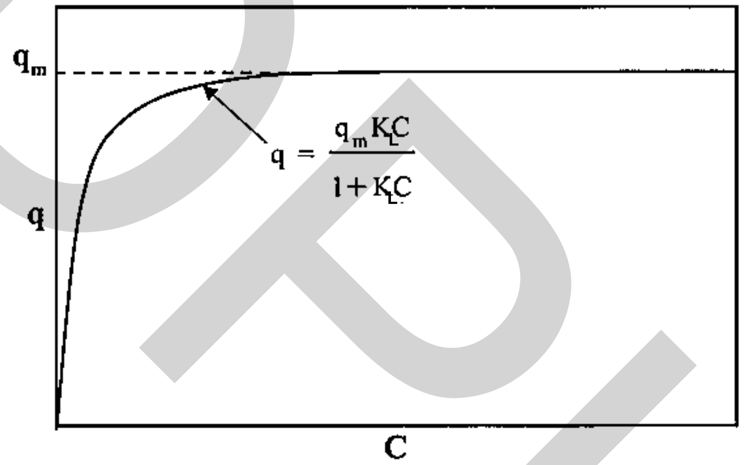
$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \qquad 2\text{-}1$$

q = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ

q_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากสุดบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (mg/g)

K_L = ค่าคงที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/mg)

C = ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

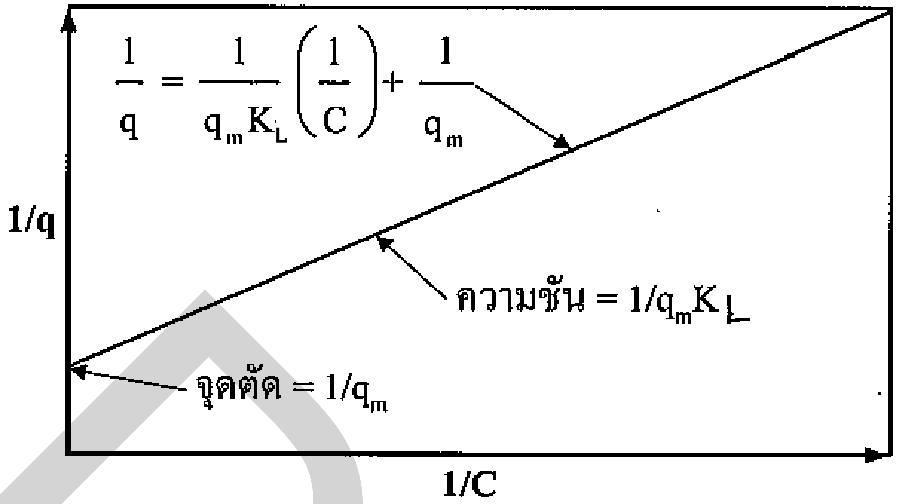


ภาพที่ 2-2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้สมการที่ 2.2

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_L}\left(\frac{1}{C}\right) + \frac{1}{q_m} \qquad 2\text{-}2$$

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K_L}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 2-3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

2.3.3.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = K_F C^{1/n} \qquad 2\text{-}3$$

สมการที่ 2-3 ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

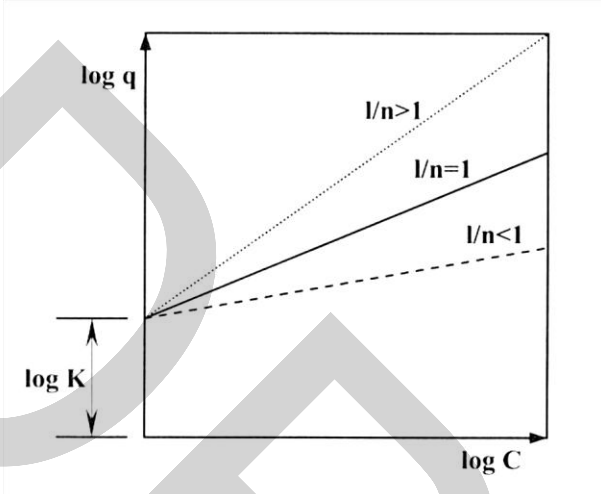
K_F หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดิช แสดงถึง ความสามารถในการดูดซับ $(mg/g)(L/mg)^{1/n}$

n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิชของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วๆไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดสมการ 2-3 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n}\log C \qquad 2\text{-}4$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q กับ log C จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ log K_F



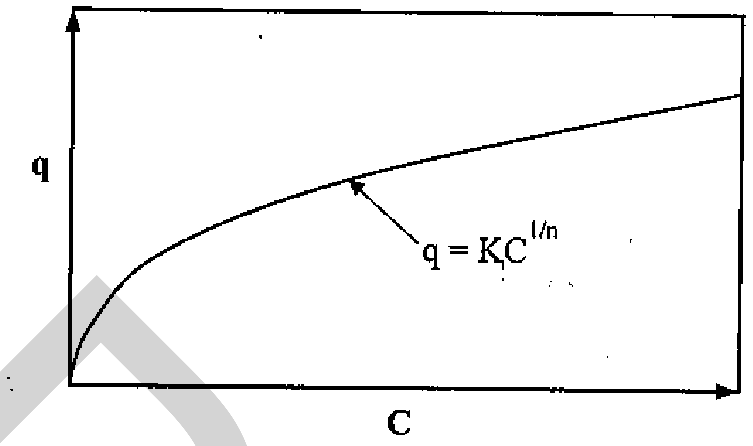
ภาพที่ 2-4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดิช

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ 2-3 ดังภาพที่ 2-4 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากสุด เนื่องจากตังถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 2-5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดิช

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Ennil Kose และ Betul Kivanc (2011) ได้ศึกษากระบวนการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำทิ้งด้วยเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา โดยศึกษาการวัดขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของเปลือกไข่ที่เตรียมได้ด้วยวิธีบีอีที (BET) พบว่าเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่ผ่านการเผามีขนาดรูพรุนแบบมีโซพอร์ โดยมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 2-10 nm (20-100 Å) ในการศึกษากระบวนการดูดซับ ปัจจัยที่เลือกทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกไข่ ระยะเวลาในการดูดซับ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับ พีเอชที่ใช้ในการดูดซับ และผลกระทบจากไอออนชนิดอื่นๆ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกไข่ที่ 800 $^{\circ}$C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่จะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้ทั้งหมด การศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับฟอสเฟตพบว่าการดูดซับฟอสเฟตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้น แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้คือ 0.1 g/50 ml โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับจะสามารถกำจัดฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ (50, 75, 100, 150 และ 200 mg/l) ได้มากขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ ส่วนพีเอชที่ศึกษาในช่วง 2-10 พบว่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ในการศึกษาผลจากไอออนชนิดอื่นๆ ได้แก่ ไนเตรต, ซัลเฟต และแอมโมเนียม ไอออน พบว่าไอออนทั้งสามชนิดไม่ส่งผลรบกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตด้วยเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา สำหรับการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับได้ศึกษาจากแบบจำลอง Pseudo-first Order และ Pseudo-second Order พบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับ

สอดคล้องกับสมการ Pseudo-second Order และในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับจาก Langmure Isotherm, Freundlich Isotherm และ Radushkevich (DR) Isotherm พบว่าในกระบวนการดูดซับฟอสเฟตด้วยเปลือกไข่มีความสอดคล้องกับ Freundlich Isotherm มากที่สุด

Nurul Aimi Binti Rohaizar และคณะ (2012) ได้ศึกษาการกำจัดคอปเปอร์ (II) ออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกไข่ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดคอปเปอร์ (II) ได้แก่ พีเอชของสารละลาย ความเร็วรอบในการปั่นกวน และระยะเวลาในการดูดซับ ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ (II) โดยใช้เปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ คือ พีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 350 รอบต่อนาที และพฤติกรรมการดูดซับคอปเปอร์ (II) ด้วยเปลือกไข่มีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich Isotherm มากกว่า Langmuir Isotherm สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับที่สอง เป็นการดูดซับทางเคมี มีขั้นกำหนดอัตราขึ้นกับกระบวนการดูดซับ

Ramakrishnaiah C.R. และ Vismitha (2012) ได้ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับราคาถูก ได้แก่ ตะกอนสารส้ม เถ้าถ่านหิน เถ้าลอยเกรด C และเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยทำการศึกษา พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตะกอนสารส้ม เถ้าลอยเกรด C และเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นตัวดูดซับ มีสภาวะที่เหมาะสมคือที่พีเอชเท่ากับ 5 และปริมาณของตัวดูดซับต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 10 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เมื่อใช้เถ้าถ่านหินเป็นตัวดูดซับมีสภาวะที่เหมาะสมคือที่พีเอชเท่ากับ 7 และปริมาณของตัวดูดซับต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7.5 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ในการศึกษาด้วยคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาถึงจุดอิ่มตัวเท่ากับ 62, 38, 34 และ 32 ชั่วโมง เมื่อใช้ ตะกอนสารส้ม เถ้าถ่านหิน เถ้าลอยเกรด C และเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นตัวดูดซับตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้นเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาถึงจุดอิ่มตัวเท่ากับ 26, 20, 20 และ 18 ชั่วโมง เมื่อใช้ตะกอนสารส้ม เถ้าถ่านหิน เถ้าลอยเกรด C และเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นตัวดูดซับตามลำดับ

Dhuha D. Salman และคณะ (2012) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับสีย้อม ได้แก่เมทิลีน บลู โบรโมฟีนอล บลู และเมทิล ออเรนจ์ด้วยเปลือกไข่ เยื่อเปลือกไข่

และเปลือกไข่ผสมเยื่อเปลือกไข่ ผลปรากฏว่าเยื่อเปลือกไข่สามารถใช้กำจัดเมทิลีน บลู ได้ดีกว่าสีย้อมชนิดอื่น และเยื่อเปลือกไข่สามารถดูดซับเมทิลีน บลู ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้เปลือกไข่ และเปลือกไข่ผสมเยื่อเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ ผลจากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เยื่อเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับเมทิลีน บลู พบว่าร้อยละการดูดซับสูงสุดเมื่อใช้เยื่อเปลือกไข่ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน ที่พีเอชเท่ากับ 10 โดยใช้อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 80 องศา-เซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของตัวดูดซับเท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

Sabir Hussain และคณะ (2011) ได้ศึกษาการกำจัดออร์โธฟอสเฟตจากน้ำเสียชุมชนด้วยหินปูนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด โดยความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้นที่ศึกษาคือ 9 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาด้วยระบบแบตซ์ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมคือ ผลของระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายออร์โธฟอสเฟต พีเอชของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้น นอกจากนี้ยังศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับและจนศาสตร์การดูดซับ ส่วนการศึกษาด้วยระบบคอลัมน์ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมคือ ผลของอัตราการไหล พีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟต การใช้หินปูนเป็นตัวดูดซับสามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้มากถึง 90 เปอร์เซ็น ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสุดของออร์โธฟอสเฟตที่ใช้คือ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดได้มากถึง 94 เปอร์เซ็น และความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดของออร์โธฟอสเฟตที่ใช้คือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดได้มากถึง 80 เปอร์เซ็น ไอโซเทอร์มการดูดซับใช้ได้ดีทั้งแลงเมียร์และฟรุนดิช (R^2>0.94) และผลการศึกษาจนพลศาสตร์พบว่า การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (R^2>0.98)

ยะโก๊ะ ขาเร็มดาเบะ (2553) ได้ศึกษาการดูดซับสารประกอบฟอสเฟตบนซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 พบว่าสมบัติการดูดซับของสารประกอบฟอสเฟตบนซีโอไลต์ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับการขยายขนาดของโครงสร้าง (Extended Structure) ของซีโอไลต์และได้ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ KH_2PO_4 พบว่าเวลาการดูดซับ 30 นาที ค่า pH 12 ส่งผลให้เกิดการดูดซับสูงสุด และพฤติกรรมการดูดซับฟอสเฟตด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich Isotherm (R^2=0.99) มากกว่า Langmuir Isotherm (R^2=0.93) แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลายชั้น หรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี และเมื่อประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักผ้าด้วยเครื่อง

ซักผ้าอัตโนมัติ โดยผ่านชุดกรองแบบน้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงถึง 94 เปอร์เซ็นต์

วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาการเตรียมผงเปลือกไข่และการดัดแปรเปลือกไข่ด้วยความร้อนและศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึก ผลการทดลองพบว่าการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผงเปลือกไข่และเปลือกไข่ดัดแปรด้วยความร้อนโดยใช้ X-ray Diffractometer รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่สอดคล้องกับรูปแบบของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอย่างดี กล่าวคือผงเปลือกไข่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปผลึกแคลไซท์และสารอินทรีย์ เมื่อศึกษาการดัดแปรเปลือกไข่ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 650 $^{\circ}$C (เวลา 16, 20 และ 24 ชั่วโมง) 670 $^{\circ}$C (เวลา 12 และ 16 ชั่วโมง) 770 $^{\circ}$C (เวลา 4 และ 6 ชั่วโมง) 800 $^{\circ}$C (เวลา 3, 4 และ 5 ชั่วโมง) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปรจะทำให้แคลเซียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้นและสารอินทรีย์ถูกกำจัดออกไปได้เพิ่มมากขึ้น ช่วงเวลาสั้นที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์แล้วได้แคลเซียมออกไซด์ในปริมาณมากเมื่อเปลือกไข่ถูกดัดแปรเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงเปลือกไข่และเปลือกไข่ดัดแปรด้วยความร้อนโดยใช้ X-ray fluorescence spectrometer พบว่าเปลือกไข่มีธาตุแคลเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่ 30% โดยน้ำหนัก ส่วนเปลือกไข่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีธาตุแคลเซียมอยู่ 70% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นเป็นองค์ประกอบรองอื่น ๆ ในเปลือกไข่และเปลือกไข่ดัดแปร ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ธาตุและองค์ประกอบของเปลือกไข่และเปลือกไข่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}$C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ธาตุ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก)	
	ESP	HT-ESP(800 $^{\circ}$C,3 h)
Ca	38.04	70.01
Mg	0.31	0.62
Na	0.07	0.14
S	0.15	0.11
P	0.11	0.22
K	0.03	0.03
Cl	0.02	<0.01
Al	<0.01	<0.01
Si	<0.01	<0.01
Fe	<0.01	<0.01
Ni	<0.01	<0.01
Zn	<0.01	<0.01
Sr	<0.01	0.01

ที่มา : วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ และคณะ (2554)

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ โดยศึกษาหาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยเปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา 0.02-5 กรัม โดยการทดลองแบบทีละเท (Batch) ภายใต้อุณหภูมิห้อง และความเข้มข้นของสารละลายออร์โธฟอสเฟต เท่ากับ 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1-11 รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อใช้น้ำทิ้งจากการปนเปื้อนออร์โธฟอสเฟตจากโรงงานอุตสาหกรรม และพิจารณาศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกไข่ไปใช้งานได้จริง ซึ่งเป็นการศึกษาและการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินการทดลอง ตามหัวข้อที่ 3.1-3.7 ดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 เปลือกไข่ไก่

3.2.2 Cellulose Nitrate Membrane (Whatman)

3.3.3 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ยี่ห้อ Thermoscientific รุ่น Biomate™ 3

3.3.4 เครื่องชั่งไฟฟ้า ยี่ห้อ Ohaus รุ่น Adventurer

3.3.5 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Eutech Instruments รุ่น Cyber Scan pH 510

3.3.6 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Burnstead Thermolyne รุ่น Furnace 48000

3.3.7 เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Memmert รุ่น Universal Oven WB 14

3.3.8 Micropipette

3.3.9 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

3.3.10 เครื่องกวนสารละลาย (Hotplate Stirrer)

3.3.11 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน 70 mesh (200 μm) บริษัท Endercotts, England

DPU

3.2 สารเคมี

3.2.1 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc.Sulfuric Acid, H_2SO_4) 95-97%, Merck/Germany

3.2.2 กรดแอสคอร์บิค (Ascrobic Acid, $C_6H_8O_6$) Ajax Finechem/Australia

3.2.3 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. Hydrochloric Acid, HCl) J.T. Baker/ USA

3.2.4 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, $CaCO_3$) Fluka/ USA

3.2.5 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) APS/ Australia

3.2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) Ajax Finechem/ Australia

3.2.7 โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium Dihydrogen Phosphate, KH_2PO_4) Ajax Chemicals/Australia

3.2.8 โพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เทรต (Potassium Antimony Tartrate, ((SbO) $C_4H_4O_6$ $\cdot 0.5H_2O$) QRëC/ New Zealand

3.2.9 แอมโมเนียมโมลิบเดท (Ammonium Molybdate, $(NH4)_6Mo_7O_6 \cdot 4\ H_2O$) 99% Ajax Finechem /Australia

3.3 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation of Method)

การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต เพื่อนำไปวิเคราะห์ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และน้ำทิ้งปนเปื้อนฟอสเฟตจากโรงงานอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ มีดังนี้คือ การสร้างกราฟมาตรฐานหาช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์ หาความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ ดังรายละเอียดการทดลองต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบความเป็นเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ (Linearity and Rang)

- การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต

การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตใช้วิธีกรดแอสคอร์บิก (กรรณิการ์, 2544) โดยมีการทดลองดังนี้

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ซึ่งเตรียมโดยชั่ง KH_2PO_4 0.4394 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร) จำนวน 100, 200, 300, 400 และ 500 ไมโครลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent จำนวน 8 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน สารละลายแต่ละขวดมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตามลำดับ ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวนี้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายที่ไม่ได้เติมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเป็นแบลงค์

นำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (mg/L) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Combine Reagent คือ 2.5 M H_2SO_4 500 mL + 1.3710 g $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 5H_2O$ 50 mL + 20 g $(NH_4)_6Mo_7O_6 \cdot 4H_2O$ 150 mL + 5.28 g Ascorbic acid 300 mL เตรียมสารละลายใหม่ทุกวัน และเก็บไว้ในขวดพลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE)

- การทดสอบหาค่าต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (Limit of Detection, LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ)

ค่าต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) สามารถคำนวณจาก Regression Line ของกราฟมาตรฐาน ได้ดังนี้ (Christian, G.D.,2004)

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n-2}}$$

$$LOD = \frac{3S_{y/x}}{b}$$

$$LOQ = \frac{10S_{y/x}}{b}$$

b คือ ความชันของสมการเส้นตรง

y_i คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวิเคราะห์จริง

$\hat{y}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่คำนวณได้จากสมการเส้นตรง

$S_{y/x}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการสร้างกราฟเส้นตรง

3.3.2 การทดสอบความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์ (Accuracy)

การทดสอบความแม่น แสดงความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ คือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ควรมีค่าเท่ากับค่าจริง (True Value) หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด แสดงค่าทางสถิติเป็นค่าร้อยละการกลับคืน (% Recovery) (เสาวภา ชูมณี, 2533)

DPU

ดังสมการ

$$\text{ร้อยละการกลับคืน} = \frac{Cu}{Cs} \times 100$$

เมื่อ Cu = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่วัดได้จากการวิเคราะห์

Cs = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงในสารตัวอย่าง (Spiked Sample)

- ร้อยละการกลับคืนสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

การทดลองนี้ได้หาร้อยละการกลับคืนของปริมาณฟอสฟอรัสซึ่งอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟตโดยทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ที่ระดับ 0.2, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร (น้ำตัวอย่างมีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 200 มิลลิลิตร และผ่านการดูดกลืนด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 2.0 กรัม เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง) ลงในสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ซึ่งอยู่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent จำนวน 8 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน สารละลายจะมีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวนี้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร การทดลองทำ 7 ซ้ำ ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นำไปหักลบกับค่าแบลงค์ของน้ำตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 3.3.1 คำนวณหาร้อยละการกลับคืน จากสมการข้างต้น

หมายเหตุ สำหรับปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่ระดับ 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำเช่นเดียวกับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เปลี่ยนสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เป็น 200 และ 300 ไมโครลิตร ตามลำดับ

- ร้อยละการกลับคืนสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา

ทำการทดลองเหมือนกับการหาร้อยละการกลับคืนสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างผ่านการดูดซับด้วยเปลือกไข่ โดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากเปลือกไข่ 2.0

กรัม ระยะเวลาการดูดซับ 3 ชั่วโมง เป็นการใช้เปลือกไข่ที่ผ่านการเผา ปริมาณ 0.1 กรัม ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที

3.3.3 การทดสอบความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ (Precision)

การทดสอบความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ คือค่าที่แสดงความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำหลายครั้งโดยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด การแสดงค่าความเที่ยงนั้นอยู่ในรูปของ Repeatability หรือ Reproducibility ซึ่งการวิจัยนี้ได้แสดงความเที่ยงในรูปของ Reproducibility

Reproducibility แสดงค่าความเที่ยงโดยทำการวิเคราะห์ซ้ำตั้งแต่ 2 ซ้ำขึ้นไปในคราวเดียวกัน โดยนักวิเคราะห์คนเดียวกัน ใช้เครื่องมือเดียวกัน

ค่าทางสถิติเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Percent Relative Standard Deviation, %RSD) เขียนได้ดังสมการ

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

เมื่อ

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

การทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ ใช้การทดลองชุดเดียวกับข้อ 3.3.2 เมื่อได้ผลการทอลองแล้วนำมาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

3.4 การเตรียม $CaCO_3$ จากเปลือกไข่และ CaO จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา

การเตรียม $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ มีวิธีการดังนี้ นำเปลือกไข่ไก่มาล้างสิ่งสกปรกออกด้วยน้ำประปาจนสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง จากนั้นนำเปลือกไข่อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 ± 10 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที บดลดขนาดด้วยเครื่องบดความเร็วสูง (Blender) ก่อนทำการร่อนผ่าน Molecular Sieve Number 70 เมช ใส่ภาชนะที่แห้งและปิดแน่น เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

การเตรียม CaO จากเปลือกไข่ (วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, 2544) มีวิธีการดังนี้ นำเปลือกไข่ไก่มาล้างสิ่งสกปรกออกด้วยน้ำประปาจนสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง จากนั้นนำเปลือกไข่อบแห้งที่

อุณหภูมิ 100 ± 10 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที บดลดขนาดด้วยเครื่องบดความเร็วสูง (Blender) ก่อนทำการร่อนผ่าน Molecular Sieve Number 70 เมช นำเปลือกไข่ที่ผ่านการร่อนเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เก็บใส่ภาชนะที่แห้งและปิดแน่น โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ และ CaO จากเปลือกไข่

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ จาก KH_2PO_4 โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาเป็นตัวดูดซับ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณของเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา ระยะเวลาในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต และ pH เริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับ โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

3.5.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

ทำการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วแปรเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 กรัม ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 330 นาที กรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาที ภายในระยะเวลา 5-60 นาที และ ทุกๆ ช่วงเวลา 30 นาที ในช่วงนาทีที่ 60-330

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาเป็น 0.02, 0.05, 0.1 และ 0.5 กรัม เป็นเวลา 60 นาที กรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาที ภายในระยะเวลา 60 นาที

3.5.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

การศึกษาระยะเวลาในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุด โดยเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 3 ค่า คือ 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ในปริมาณที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

สูงสุดจากข้อ 3.5.1 ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลา 300 นาที แล้วกรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 10 นาที ภายในระยะเวลา 10-60 นาที และ ทุกๆ ช่วงเวลา 30 นาที หลังจากนาทีที่ 60-300

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา โดยเติมเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาในปริมาณที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุดจากข้อ 3.5.1 ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลา 60 นาที แล้วกรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาที ภายในระยะเวลา 60 นาที

3.5.3 ศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

การศึกษาค่า pH เริ่มต้นในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุด โดยแปรเปลี่ยนค่า pH 1, 4, 7, 9 และ 11 ของน้ำเสียสังเคราะห์ และเปลี่ยนความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 3 ค่า คือ 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ในปริมาณที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุดจากข้อ 3.5.1 ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีจากนั้นกรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ตามระยะเวลาการดูดซับในข้อ 3.5.2

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา โดยเติมเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาในปริมาณที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุดจากข้อ 3.5.1 ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีจากนั้นกรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ตามระยะเวลาการดูดซับในข้อ 3.5.2

3.6 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ และ CaO จากเปลือกไข่

ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ โดยศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่เตรียมจาก KH_2PO_4 ด้วยการเลือกปัจจัยการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองข้อ 3.5 ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

3.6.1 ชั่งเปลือกไข่บด 2.0 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตตั้งแต่ 0-140 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.6.2 ตีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง และ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1

3.6.3 กรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือ (C) กับปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (X/M) บนกราฟลอการิทึม

3.6.4 พิจารณาความสามารถในการดูดซับ โดยเปรียบเทียบค่า R^2 ว่ามีความสอดคล้องกับสมการฟรุนดิชไอโซเทอร์ม (Fruendlich Isotherm) หรือสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir Isotherm) และอ่านค่า K และ 1/n จากกราฟสมการ Fruendlich

ในการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา 0.1 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที แทนการใช้เปลือกไข่บด 2.0 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง โดยปรับ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 7

3.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ $CaCO_3$ และ CaO จากเปลือกไข่

ศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้งปนเปื้อนออร์โธฟอสเฟตจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับ โดยเลือกปัจจัยการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองข้อ 3.5 ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

3.7.1 นำน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตรวจวัดค่า pH และความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต

3.7.2 ชั่งเปลือกไข่บด 5.0 g ใส่ลงในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.7.3 ตีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง

3.7.4 กรองสารละลายด้วย Cellulose Nitrate Membrane แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อหาร้อยละการดูดซับฟอสเฟต

ในการทดลองหาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้งปนเปื้อนฟอสเฟตจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 g ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที แทนการใช้เปลือกไข่บด 5.0 g ระยะเวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation of Method)

4.1.1 ผลการทดสอบความเป็นเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ (Linearity and Rang)

จากการทดสอบความเป็นเส้นตรง ได้ศึกษาความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในช่วง 0.2-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-1 และนำผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตซึ่งปนเปื้อนออร์โธฟอสเฟต แสดงดังภาพที่ 4-1

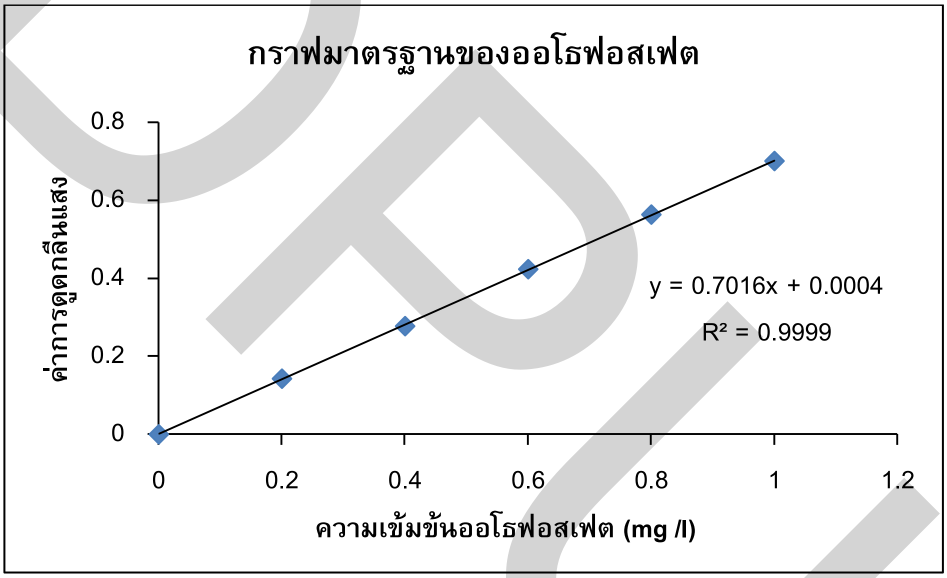
ตารางที่ 4-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร

ออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 nm
0.0	0.000±0.000
0.2	0.143±0.006
0.4	0.277±0.001
0.6	0.423±0.003
0.8	0.563±0.001
1.0	0.701±0.006

หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ $\bar{X} + SD, n = 3$

DPU

สมการถดถอย (regression equation)	y = 0.7016x-0.0004
ค่าความชัน (slope)	= 0.7016
ค่าจุดตัด (intercept)	= -0.0004
Correlation Coefficient (r)	= 1.0000
R Squre	= 0.9999
$S_{y/x}$	= 0.002746
ค่าต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOD)	= 0.0117 มิลลิกรัมต่อลิตร
ค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ)	= 0.0391 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง

4.1.2 ผลการทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์

การทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับด้วยเปลือกไข่ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ระดับ คือ 0.2, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างหลังการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

การทำซ้ำ	ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/l)		
	0.2	0.4	0.6
1	0.210	0.416	0.623
2	0.209	0.409	0.666
3	0.201	0.412	0.601
4	0.200	0.404	0.619
5	0.209	0.410	0.616
6	0.197	0.397	0.611
7	0.210	0.407	0.607
ค่าเฉลี่ย	0.205	0.408	0.620
SD	0.006	0.006	0.021
% RSD	2.72	1.49	3.45
% Recovery	103.19	101.96	103.41

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า วิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิกมีความน่าเชื่อถือเพราะในการทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์พบว่า ร้อยละการกลับคืน (%Recovery) อยู่ในช่วง 101.96-103.41% และในการทดสอบความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ แสดงค่าทางสถิติเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) มีค่า 1.49-3.45 % ซึ่งไม่เกิน 5 % ดังนั้นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิกจึงมีความน่าเชื่อถือเพราะมีความแม่นยำและความเที่ยงสูง

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา

ผลศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต ได้แก่ ปริมาณที่เหมาะสมของตัวดูดซับ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ และค่า pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

ในการทดลองนี้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเตรียมจากเปลือกไข่ และแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเตรียมจากเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, 2544) ได้ผลการทดลองดังนี้

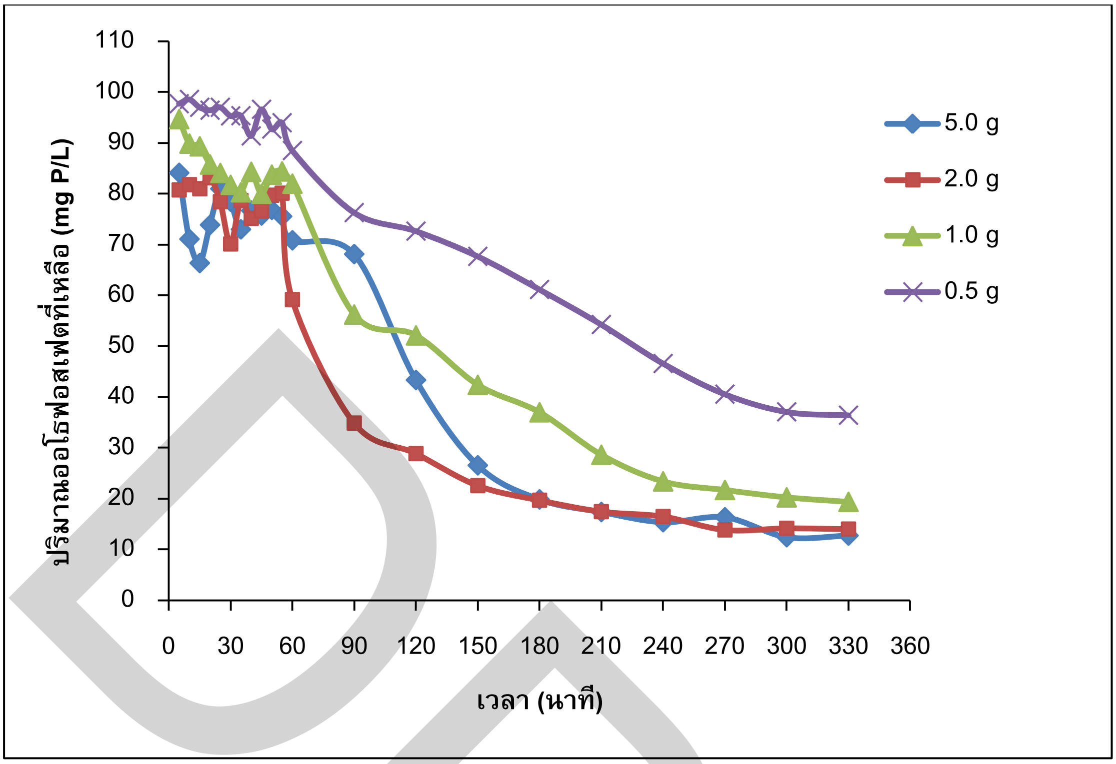
4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

จากการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยศึกษาปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 กรัม โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 4.93 ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 330 นาที และเก็บน้ำตัวอย่างสังเคราะห์เพื่อการวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาที ภายในระยะเวลา 5-60 นาที และทุกๆ ช่วงเวลา 30 นาที ในช่วงนาทีที่ 61-330 ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/l ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 ml

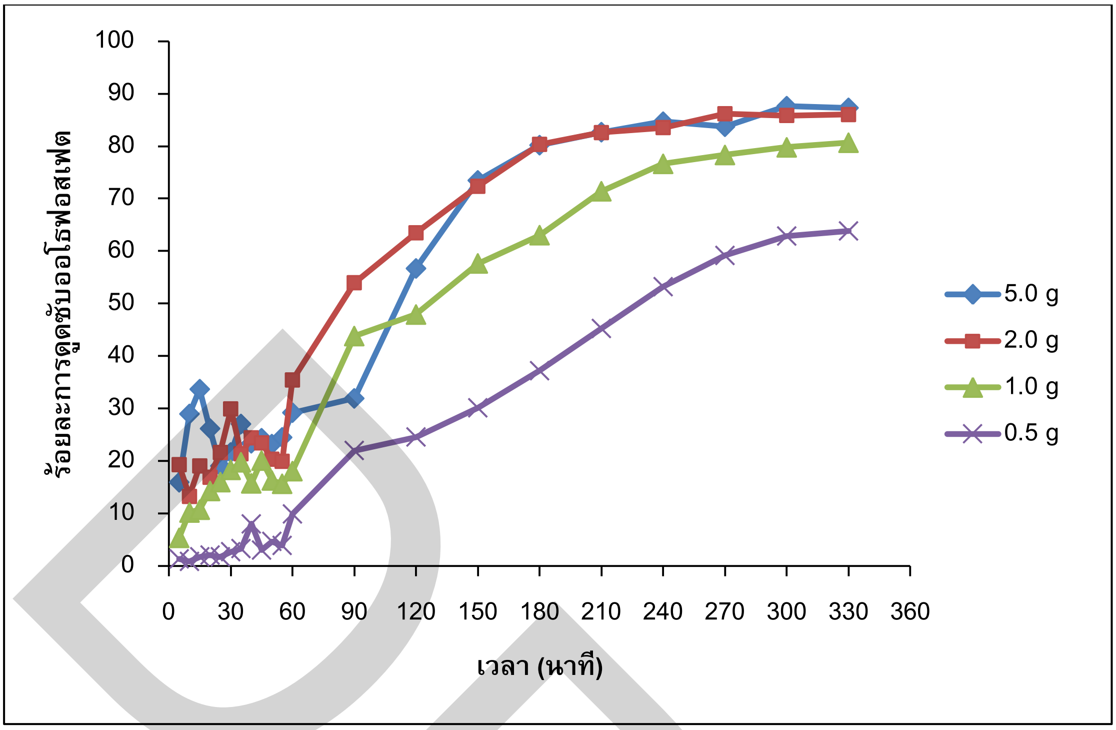
เวลาการดูดซับ (นาที)	ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ (mg /l)			
	0.5 g	1.0 g	2.0 g	5.0 g
5	97.69±1.51	94.68±2.86	80.73±2.89	84.08±5.04
10	98.54±0.96	89.85±3.10	81.77±2.93	71.06±2.54
15	96.99±1.97	89.32±9.25	80.97±6.55	66.34±1.11
20	96.43±2.34	85.74±5.82	83.13±3.13	73.85±1.54
25	96.99±1.97	84.05±3.97	78.41±4.85	80.97±6.03
30	95.30±3.08	81.72±3.93	70.10±7.15	78.41±4.04
35	95.34±2.09	80.27±5.07	78.65±7.28	72.97±2.77
40	91.36±3.89	84.30±3.52	75.13±8.74	76.65±3.63
45	96.59±0.93	79.95±1.33	76.57±1.68	75.69±3.19
50	92.71±4.13	83.73±4.42	79.69±1.05	76.81±4.08
55	93.95±3.35	84.38±1.19	80.09±2.46	75.53±2.89
60	88.48±3.99	81.96±3.22	59.14±2.89	70.82±3.32
90	76.27±2.65	56.21±5.55	34.84±3.06	68.10±0.97
120	72.63±4.23	52.10±3.95	28.85±2.54	43.32±2.45
150	67.66±3.36	42.36±3.76	22.53±1.68	26.53±1.08
180	61.14±2.65	36.97±5.94	19.66±1.83	19.82±1.94
210	54.24±1.34	28.60±3.24	17.42±0.37	17.34±1.68
240	46.57±0.35	23.37±2.15	16.46±1.63	15.34±1.83
270	40.53±0.46	21.68±0.84	13.82±1.52	16.30±2.59
300	37.05±0.14	20.23±1.21	14.14±2.63	12.38±1.00
330	36.39±0.63	19.35±0.50	13.98±1.05	12.70±1.38

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือเท่ากับ $\bar{X} + SD, n = 3$



ภาพที่ 4-2 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-330 นาที

ผลการทดลองการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 4-2 พบว่าแนวโน้มของการดูดซับไม่คงที่ในช่วง 0-60 นาที เนื่องจากยังไม่ถึงเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ (Equilibrium Time) แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือหลังจากดูดซับจะลดลงในทุกๆ ตัวดูดซับที่ปริมาณต่างๆ โดยการใช้ตัวดูดซับในปริมาณ 2.0 และ 5.0 กรัม ส่งผลให้เกิดการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุดในช่วงเวลา 180-330 นาที โดยมีความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 80 ดังแสดงในภาพที่ 4-3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจึงมีจำนวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้มากขึ้น ดังนั้นเวลาที่ 180 นาที จึงเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล



ภาพที่ 4-3 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-330 นาที

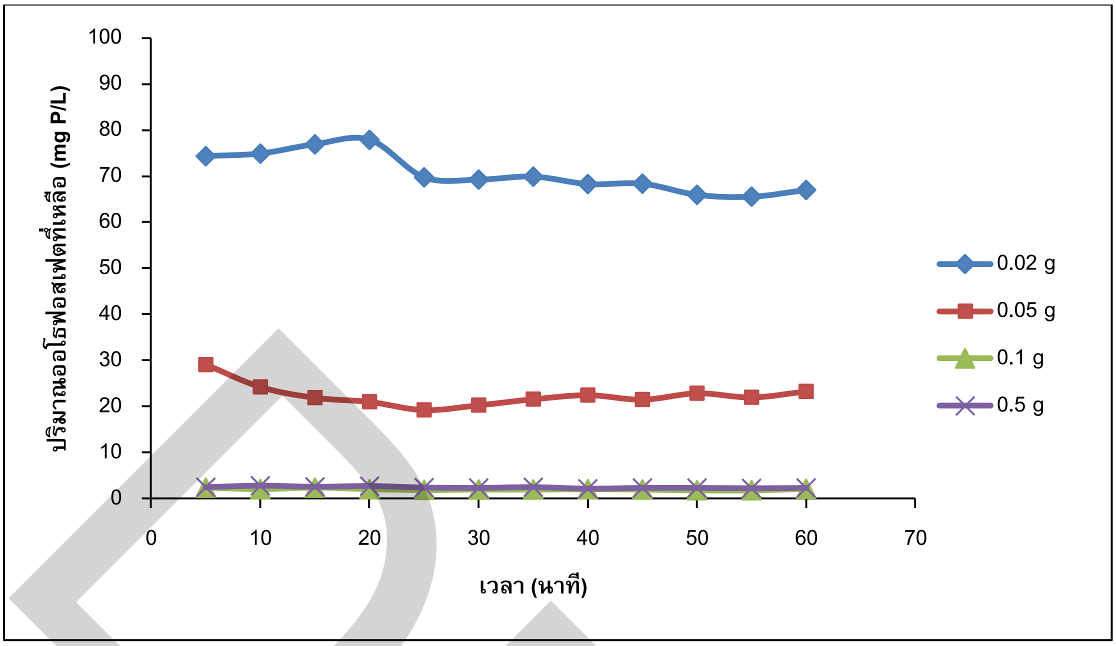
จากการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 4.93 โดยแปรเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา 0.02, 0.05, 0.1 และ 0.5 กรัม ตีกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลา 30 นาที และเก็บน้ำตัวอย่างสังเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาที ภายในระยะเวลา 60 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาในปริมาณต่าง ๆ ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร

เวลาการดูดซับ (นาที)	ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ (mg/l)			
	0.02 g	0.05 g	0.1 g	0.5 g
5	75.04±3.76	29.05±0.51	2.59±0.17	2.71±0.68
10	74.80±0.68	24.70±3.59	2.11±0.17	3.07±0.17
15	76.61±2.22	22.65±2.39	2.35±0.17	2.83±0.51
20	77.82±0.51	21.80±1.88	1.99±0.00	3.31±0.17
25	69.37±1.20	18.78±1.02	1.87±0.17	2.47±0.34
30	68.52±1.71	20.23±0.00	1.99±0.00	2.47±0.34
35	70.21±2.73	21.92±0.34	1.87±0.17	2.47±0.34
40	68.52±1.02	22.89±0.68	1.99±0.00	2.23±0.00
45	68.28±0.68	21.80±1.54	1.99±0.00	2.35±0.17
50	66.23±1.88	23.37±1.37	1.87±0.17	2.35±0.51
55	65.87±2.73	22.53±1.54	1.87±0.17	2.11±0.17
60	67.43±1.88	23.85±0.34	1.99±0.00	2.23±0.34

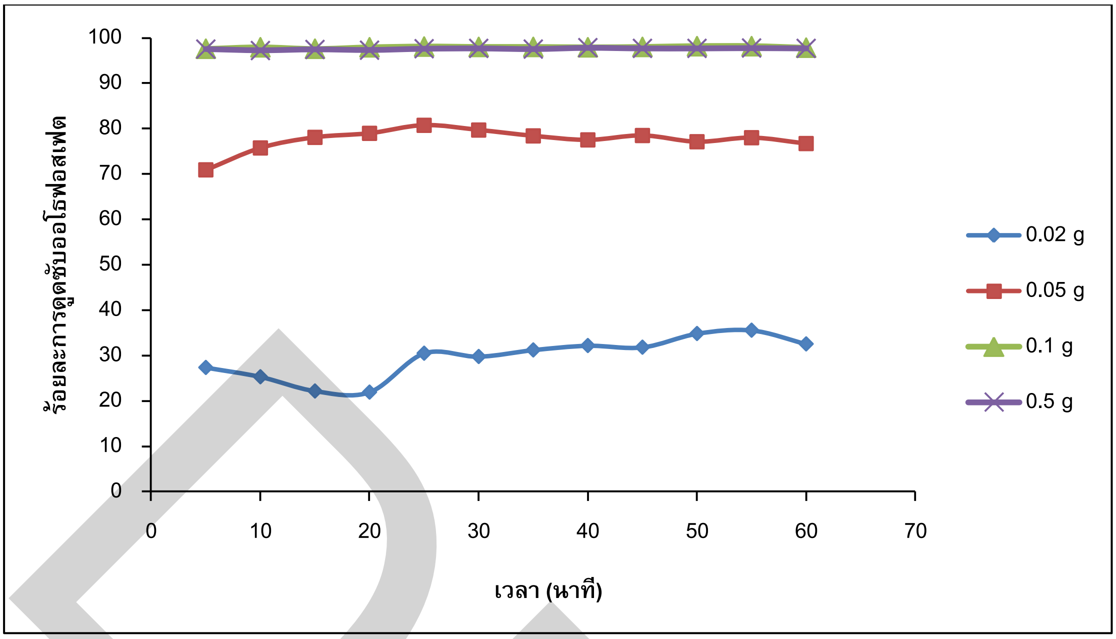
หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือเท่ากับ $\bar{X} + SD, n = 3$

DPU



ภาพที่ 4-4 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาในปริมาณต่างๆ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-60 นาที

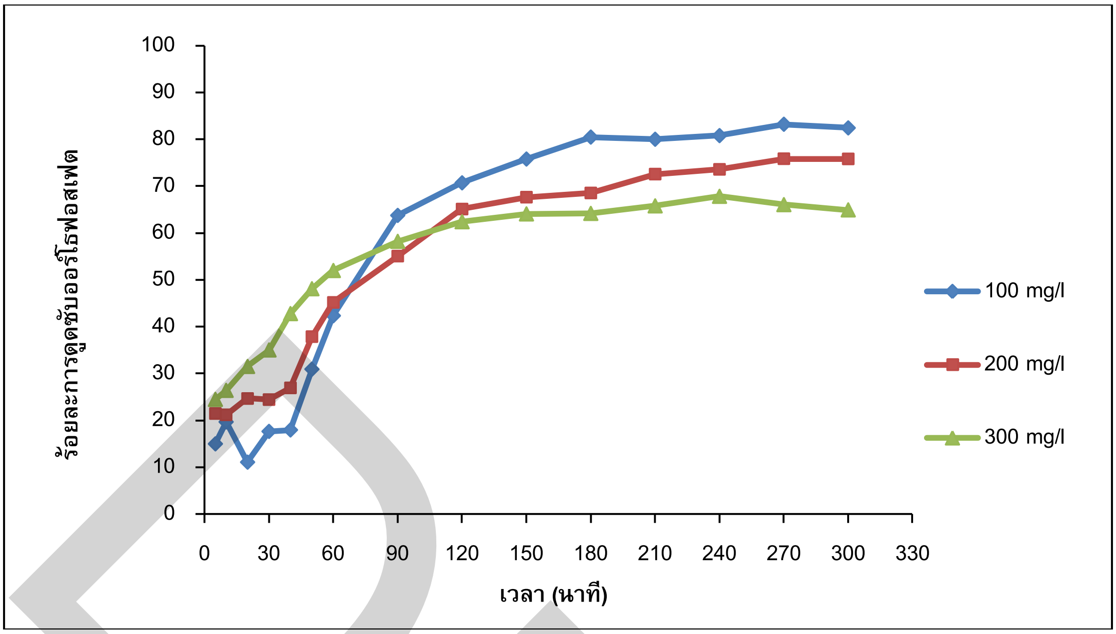
ผลการทดลองการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 4-4 พบว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับในปริมาณ 0.1 และ 0.5 กรัม ส่งผลให้ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือหลังจากดูดซับมีปริมาณน้อยและค่อนข้างคงที่ในทุกช่วงเวลาตั้งแต่ 5-60 นาที โดยความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในช่วงเวลาต่างๆ มีค่ามากกว่าร้อยละ 97 แสดงในภาพที่ 4-5



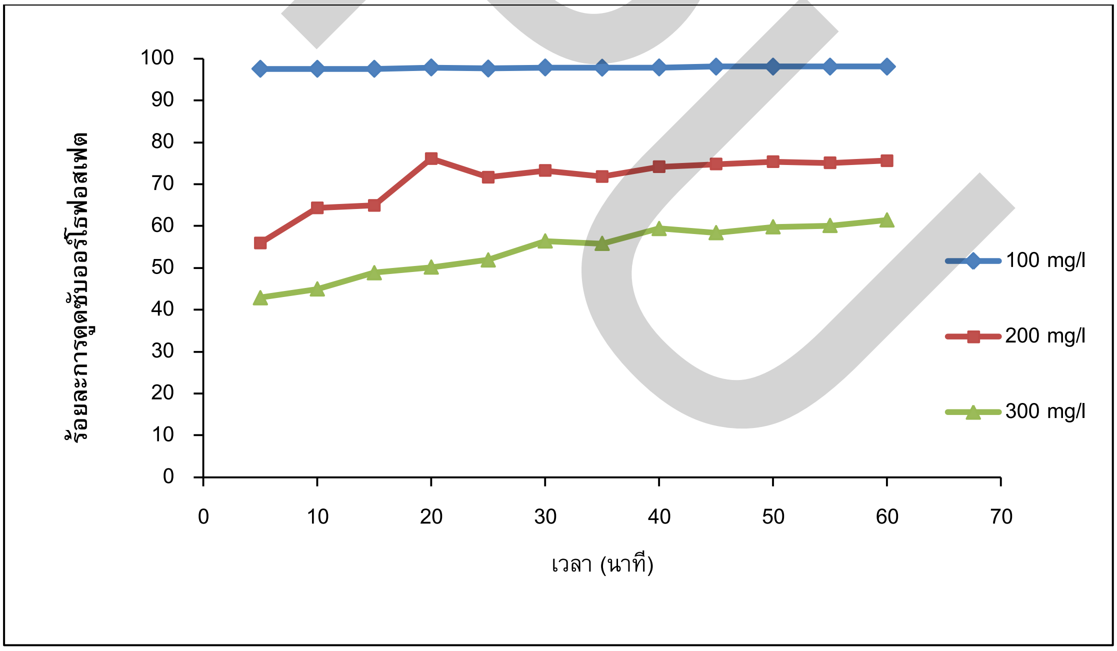
ภาพที่ 4-5 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-60 นาที

4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

จากการทดลองหาระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น 3 ค่า คือ 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 2.0 กรัม และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมหรือมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับ แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4-6 และ 4-7 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-6 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 2.0 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-300 นาที



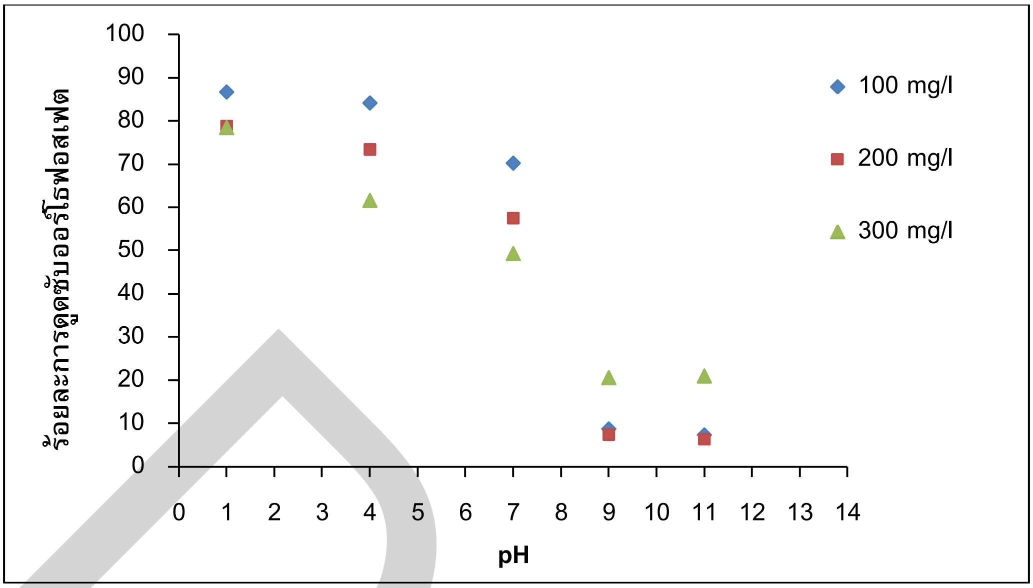
ภาพที่ 4-7 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ 0.1 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-60 นาที

จากภาพที่ 4-6 เมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้นส่งผลให้ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เพิ่มสูงขึ้น และการดูดซับออร์โธฟอสเฟตจะเริ่มคงที่เมื่อการดูดซับผ่านไป 180 นาที โดยการใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลาการดูดซับ 180-300 นาที ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงเฉลี่ยร้อยละ 80, 70 และ 60 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่มีเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับอยู่ที่ 3 ชั่วโมง

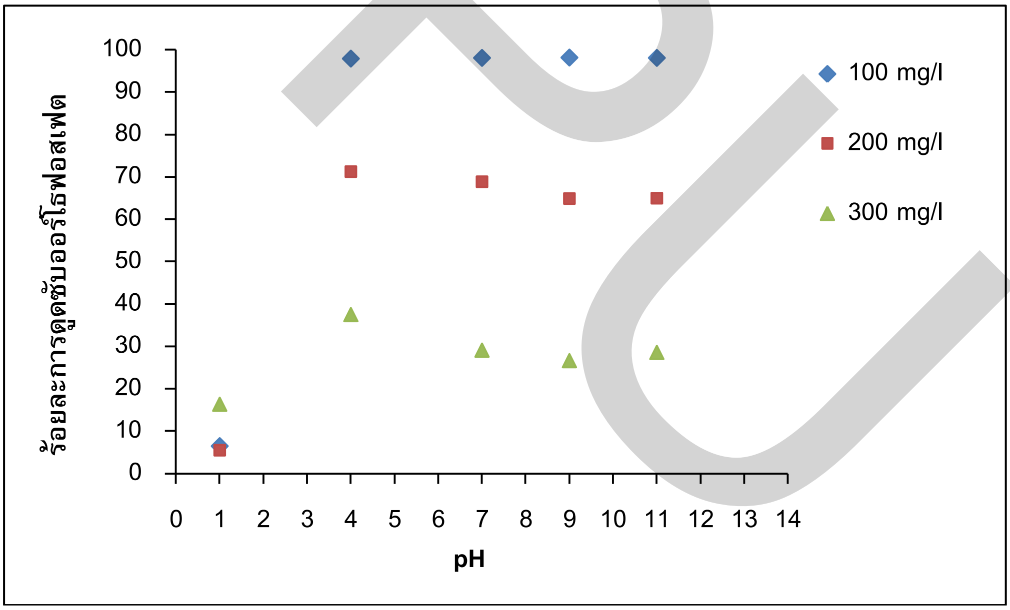
จากภาพที่ 4-7 การดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา ระยะเวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างมีค่าสูงกว่าร้อยละ 98 แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเท่ากับ 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้การดูดซับเริ่มคงที่เมื่อการดูดซับผ่านไป 30 นาที ซึ่งในนาทีที่ 30-60 ความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 74 และ 58 ตามลำดับ เนื่องจากสัดส่วนระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับต่อ Active Sites บนตัวดูดซับที่สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยๆ มีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้อย ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในสารละลายเริ่มต้นมีน้อย เมื่อผ่านการดูดซับแล้วปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือในสารละลายจึงเหลือน้อยกว่าในสารละลายที่มีปริมาณออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้นสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาการดูดซับ 30 นาทีเป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

การทดลองนี้ใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟต 3 ค่าคือ 100, 200 และ300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยการปรับค่า pH ของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ปริมาณ 2.0 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 180 นาที และปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที ซึ่งเป็นปริมาณและเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสม แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4-8 และภาพที่ 4-9 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-8 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 2.0 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 180 นาที



ภาพที่ 4-9 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

จากภาพที่ 4-8 พบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่คือ pH ที่ 1 และ 4 ซึ่งในการทดลองเมื่อใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 2 กรัม ความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตจากน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าร้อยละ 86.28 และ 85.30 เมื่อปรับ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 และ 4 ตามลำดับ แต่เมื่อ pH ในสารละลายสูงขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตลดลง เนื่องจากการปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มาก นั่นคือตัวดูดซับสามารถดูดซับฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้บริเวณเยื่อเปลือกไข่มีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่เอมีน (NH_2^-) และหมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) (ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์, 2544) ซึ่งจะเป็นประจุลบในสารละลายจึงผลักกับประจุลบของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แต่เมื่ออยู่ในสารละลายกรดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะไปจับกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย ทำให้ผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวกจับกับฟอสเฟตไอออนได้มาก และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจึงสงผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบลดลง

จากภาพที่ 4-9 พบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาคือ pH อยู่ในช่วง 4-11 ซึ่งในการทดลองเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม ความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตจากน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าร้อยละ 97.34-97.59 ส่วนที่ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 ส่งผลให้เกิดการละลายของตัวดูดซับ (CaO จากเปลือกไข่เผา) เกิดปฏิกิริยากรด-เบส มากกว่าการดูดซับจึงส่งผลให้ร้อยละการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างลดลง นอกจากนี้จะเห็นว่า pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 และ 4 เกิดความแตกต่างในการดูดซับออโธฟอสเฟตมาก เนื่องจากเมื่อเติมตัวดูดซับคือ CaO จากเปลือกไข่เผาลงไปในสารละลายที่มี pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 หลังจากกระบวนการดูดซับพบว่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น (มากกว่า 7) ในขณะที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 1 หลังจากกระบวนการดูดซับพบว่า pH ของสารละลายต่ำกว่า 7 นั่นคือสารละลายยังอยู่ในสภาวะกรด ในขณะที่ pH 4, 7, 9 และ 11 หลังจากกระบวนการดูดซับ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นอยู่ในสภาวะกลางและเบส ส่งผลให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุที่พื้นผิวเป็นบวก ส่งผลให้ค่าศักย์ซีต้า (Zeta Potential) มีค่าเป็น

บวกมาก (T. Ennil Kose and B. Kivanc, 2011) จึงดูดซับกับสารละลายออโธฟอสเฟตซึ่งมีประจุเป็นลบได้ดี ส่งผลให้ร้อยละในการดูดซับออโธฟอสเฟตมีค่าสูง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ T. Ennil Kose และ B. Kivanc

4.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา

จากการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ 2.0 กรัม และความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตตั้งแต่ 0-120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ตีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่สภาวะ pH เท่ากับ 1 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือจากการดูดซับ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4-5 แล้วนำผลการทดลองมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตตามสมการของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm

ในการหาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตโดยการใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม และความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตตั้งแต่ 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ตีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่สภาวะ pH เท่ากับ 7 ระยะเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของออร์โธฟอสเฟตที่เหลือจากการดูดซับ ได้ผลดังตารางที่ 4-6 แล้วนำผลการทดลองมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตตามสมการของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm

ตารางที่ 4-5 ผลของความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟตต่อการดูดซับด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่

$CaCO_3$ จากเปลือกไข่ (g)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
ปริมาณฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/l)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
ปริมาณฟอสเฟต หลังจากดูดซับ (mg/l)	0.840	0.947	1.042	1.196	1.208	1.492	1.682

หมายเหตุ ใช้ปริมาณออร์โธฟอสเฟต 200 มิลลิลิตร ระยะเวลาดูดซับ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-6 ผลของความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟตต่อการดูดซับด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา

CaO จากเปลือกไข่ (g)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ปริมาณฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/l)	50.0	75.0	100	150	200
ปริมาณฟอสเฟตหลังจากดูดซับ (mg/l)	0.261	0.510	0.568	16.695	26.042

หมายเหตุ ใช้ปริมาณออร์โธฟอสเฟต 200 มิลลิลิตร ระยะเวลาดูดซับ 30 นาที

คำนวณ q เมื่อใช้ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในปริมาณต่าง ๆกัน

$$qW = V(C_0-C)$$

เมื่อ W = 2.0 g, V = 200 ml หรือ 0.20 L , C_0 = 20 และ C = 0.840 mg/l

$$q(2.0\ g) = 0.20\ L\ (20-0.840\ mg/l)$$

$$q = 1.916\ mg/g$$

ค่า q ที่คำนวณได้, W, C_0 และ C แสดงดังตารางที่ 4-8

ในทำนองเดียวกัน

เมื่อ W = 0.1 g, V = 200 ml หรือ 0.20 L , C_0 = 50 และ C = 0.261 mg/l

$$q(0.1\ g) = 0.20\ L\ (50-0.261\ mg/l)$$

$$q = 99.478\ mg/g$$

ค่า q ที่คำนวณได้, W, C_0 และ C แสดงดังตารางที่ 4-9

โดย W คือ น้ำหนักของ $CaCO_3$ หรือน้ำหนักของ CaO จากเปลือกไข่ (g)

C_0 คือ ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/l)

C คือ ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/l)

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 2.0 g ที่ pH เท่ากับ 1

$CaCO_3$ from eggshell(g)	C_0 (mg/l)	C (mg/l)	q mg/g CaCO3 from eggshell
2	20	0.840	1.916
2	30	0.947	2.905
2	40	1.042	3.896
2	50	1.196	4.880
2	60	1.208	5.879
2	70	1.492	6.851
2	80	1.682	7.832

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ CaO จากเปลือกไข่เผา 0.1 g ที่ pH เท่ากับ 7

CaO from eggshell(g)	C_0 (mg/l)	C (mg/l)	q mg/g CaO from eggshell
0.1	50	0.261	99.478
0.1	75	0.510	148.980
0.1	100	0.568	198.863
0.1	150	16.695	266.610
0.1	200	26.042	347.917

ตารางที่ 4-9 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ 2.0 g ที่ pH เท่ากับ 1

C (mg/l)	q (mg/g)	1/C	1/q	log C	log q
0.840	1.916	1.191	0.522	-0.076	0.282
0.947	2.905	1.056	0.344	-0.024	0.463
1.042	3.896	0.960	0.257	0.018	0.591
1.196	4.880	0.836	0.205	0.078	0.688
1.208	5.879	0.828	0.170	0.082	0.769
1.492	6.851	0.670	0.146	0.174	0.836
1.682	7.832	0.594	0.128	0.226	0.894

ตารางที่ 4-10 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โดยใช้ CaO จากเปลือกไข่ 0.1 g ที่ pH เท่ากับ 7

C (mg/l)	q (mg/g)	1/C	1/q	log C	log q
0.261	99.478	3.835	0.01005	-0.584	1.998
0.510	148.980	1.961	0.00671	-0.293	2.173
0.568	198.863	1.759	0.00503	-0.245	2.299
16.695	266.610	0.060	0.00375	1.223	2.426
26.042	347.917	0.038	0.00287	1.416	2.541

เมื่อใช้วิธี Least Square Fit จากสมการที่ 2-4

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n}\log C$$

จะได้ $\log q = 0.5126 + 1.9573 \log C$

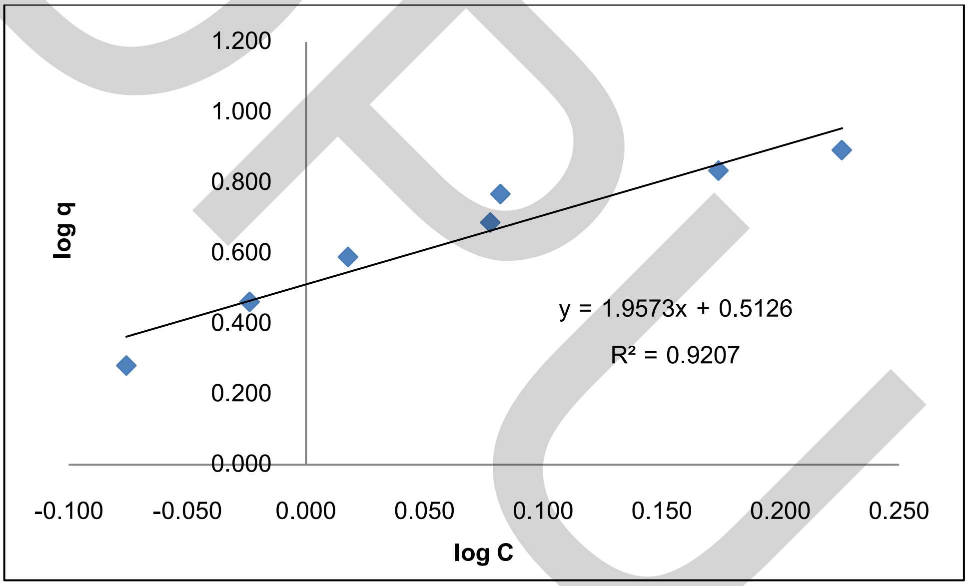
$R^2 = 0.9207$

$\log q = 2.2246 + 0.2067 \log C$

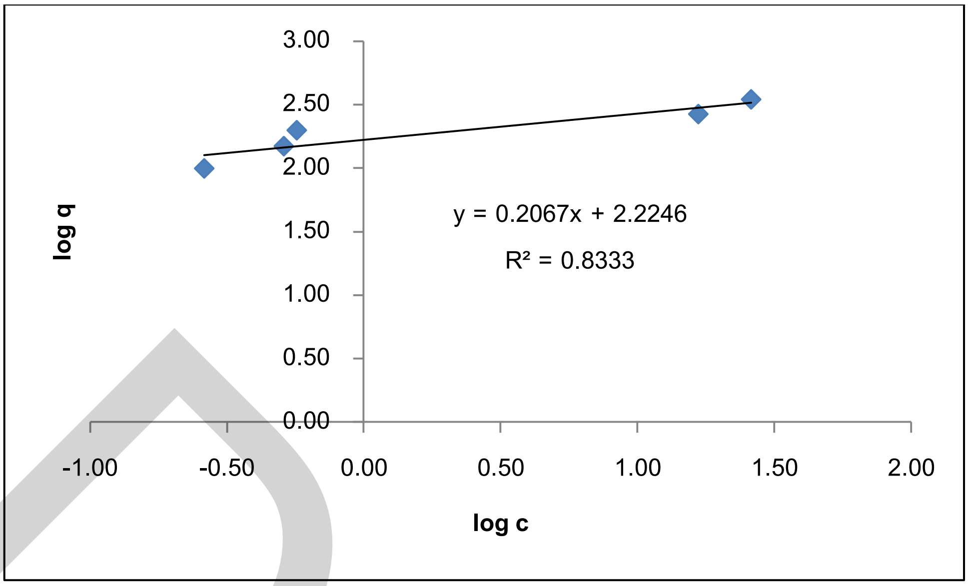
$R^2 = 0.8333$

โดย K_F = ค่าปริมาณการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ (Adsorption Capacity, mg/g)

1/n = Adsorption intensity



ภาพที่ 4-10 ฟรุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ที่ pH เท่ากับ 1



ภาพที่ 4-11 ฟรุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา ที่ pH เท่ากับ 11

เมื่อใช้วิธี least square fit จากสมการที่ 2-2

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_L}\left(\frac{1}{C}\right) + \frac{1}{q_m}$$

จะได้

$$\frac{1}{q} = -0.2931 + 0.6232\left(\frac{1}{C}\right)$$

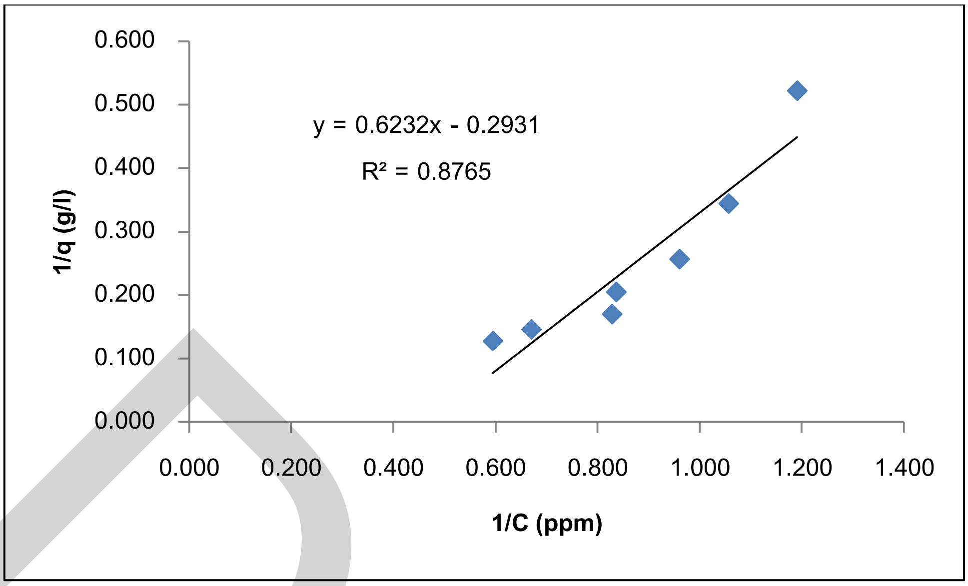
$$R^2 = 0.8765$$

จะได้

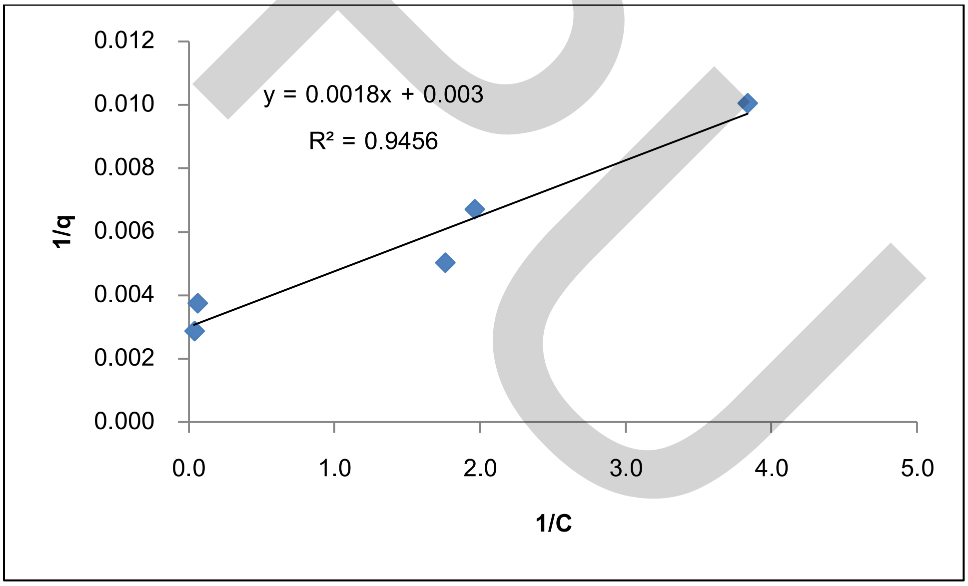
$$\frac{1}{q} = 0.003 + 0.0018\left(\frac{1}{C}\right)$$

$$R^2 = 0.9456$$

DPU



ภาพที่ 4-12 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ ที่ pH เท่ากับ 1



ภาพที่ 4-13 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่เผา ที่ pH เท่ากับ 11

จากกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ สามารถอ่านค่า K_F และค่า 1/n ได้ และจากการพิจารณาค่า R^2 แสดงให้เห็นว่าการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่จะสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชได้ดีกว่าแลงเมียร์

DPU

จาก $$\log q = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right)\log C$$

$$\log q = 0.5126+1.9573 \log C$$

$$\log q = 0.5126 + \log C^{1.9573}$$

$$\log \frac{q}{C^{1.9573}} = 0.5126$$

$$q = 10^{0.5126} C^{1.9573}$$

$$= 3.26 C^{1.9573}$$

สมการการดูดซับฟรุนดลิช คือ $q = 3.26 C^{3.6599}$

$$\frac{1}{n} = 1.9573$$

$$K_F = 3.26 \text{ mg/g}$$

จากค่า K_F และ 1/n สามารถอธิบายความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ ซึ่งพบว่าค่าของความชัน 1/n มีค่ามากกว่า 1 และค่า K_F ของการดูดซับมีค่าสูงแสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งนิพนธ์ และคณิตา (2550) อธิบายความชันไว้ 3 แนวทางคือ 1/n = 1 อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่า 1/n > 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และ 1/n < 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ ทั้งนี้สรุปได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้และพฤติกรรมการดูดซับเป็นลักษณะการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับออร์โธฟอสเฟตสามารถเกิดได้บนพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ได้หลายชั้น

ส่วนการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaO จากเปลือกไข่เผาจะสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดิช เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ

ตารางที่ 4-11 ข้อมูลค่าคงที่และความถูกต้องของข้อมูลจากสมการแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

Adsorbent	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	q_m (mg / g)	K_L (L / mg)	R^2	K_F $((mg/g)(L/mg)^{1/n})$	$\frac{1}{n}$	R^2
$CaCO_3$ จากเปลือกไข่	*	*	0.8765	3.2554	1.9573	0.9207
CaO จากเปลือกไข่เผา	333.33	1.67	0.9456	167.72	0.2067	0.8333

* ค่า q_m และ ค่า K_L มีค่าติดลบแสดงว่าแบบจำลองแบบแลงเมียร์ไม่เป็นจริงในกรณีนี้

จากการศึกษา Adsorption Isotherm ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาแสดงข้อมูลค่าคงที่และความถูกต้องของข้อมูล (R^2) ดังตารางที่ 4-11 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่มีความสอดคล้องกับสมการฟรุนดิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ ส่วนการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผามีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดิช โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (R^2) ของสมการที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการทั้งสอง ซึ่งสมการแลงเมียร์จะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/q กับ 1/C สามารถคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุดของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (q_m) และค่า K_L ซึ่งเป็นค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการดูดซับต่ออัตราการคายการดูดซับได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟ จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการแลงเมียร์ได้ดังภาพที่ 4-11 และ 4-13 สำหรับสมการของฟรุนดิชจะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log q กับ log C สามารถหาค่าคงที่ของฟรุนดิชซึ่งแสดงปริมาณการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (K_F) และค่า Adsorption Intensity (1/n) ได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่า

ความชันของกราฟ จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการฟรุนดิชได้ดังภาพที่ 4-10 และ 4-11 และสรุปค่าปริมาณการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุด (q_{max}) ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว (K_L) ค่าปริมาณการดูดซับ (K_F) และค่า Adsorption Intensity (1/n) ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไว้ดังตารางที่ 4-11

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่และ CaO จากเปลือกไข่เผา

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้รับการอนุเคราะห์น้ำเสียจากการล้างภาชนะในส่วนของโรงงานผลิตขนมปัง บริษัท จังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด และน้ำเสียจากกระบวนการผลิต บริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4-12

DPU

ตารางที่ 4-12 ข้อมูลการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

ตัวดูดซับ	pH เริ่มต้นของน้ำเสีย	แหล่งน้ำเสีย	ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ(mg/l)	% Adsorption
CaO จากเปลือกไข่เผา	7.34	น้ำทิ้งจากการล้างภาชนะ (บริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด)	28.26±0.04	0.0647±0.02	99.94±0.03
	7.02	น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (บริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด)	30.20±0.07	0.2711±0.01	99.10±0.03
$CaCO_3$ จากเปลือกไข่	7.34	น้ำทิ้งจากการล้างภาชนะ (บริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด)	28.26±0.04	19.65±1.17	30.46±4.14
	7.02	น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (บริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด)	30.20±0.07	22.58±1.79	23.67±3.22

หมายเหตุ : %Adsorption เท่ากับ $\bar{X} + SD, n = 3$

จากตารางที่ 4-12 แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาสามารถกำจัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสองแหล่งโดยไม่ต้องมีการปรับ pH เริ่มต้น ซึ่งความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 99 ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เมื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำเสียจากทั้งสองแหล่ง มีความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเพียงร้อยละ 23-31 แต่เมื่อปรับ pH เริ่มต้นของน้ำทิ้งจากทั้งสองแหล่งให้อยู่ในสภาวะกรดคือ pH เท่ากับ 4 และ 1 เพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยเปลือกไข่โดยการใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจะมีค่ามากเมื่อน้ำเสียในแต่ละแหล่งมี pH เท่ากับ 1 เนื่องจากก่อนและหลังจากกระบวนการดูดซับ น้ำเสีย

ยังคงมี pH อยู่ในสภาวะกรดดังเดิม แต่เมื่อปรับ pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 ภายหลังจากกระบวนการดูดซับ pH ของสารละลายได้เพิ่มสูงขึ้นทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการหา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่โดยการใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์

ตารางที่ 4-13 ข้อมูลการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่โดยทำการปรับ pH ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ

ตัวดูดซับ	pH เริ่มต้นของน้ำเสีย	แหล่งน้ำเสีย	ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ(mg/l)	% Adsorption
$CaCO_3$ จากเปลือกไข่	1.16±0.03	น้ำทิ้งจากการล้างภาชนะ (บริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด)	28.26±0.04	7.41±0.96	73.73±3.42
		น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (บริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด)	30.20±0.07	1.99±0.63	93.41±2.10
	4.18±0.02	น้ำทิ้งจากการล้างภาชนะ (บริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด)	28.26±0.04	20.03±0.53	29.14±1.88
		น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (บริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด)	30.20±0.07	17.54±0.60	41.92±1.98

หมายเหตุ : %Adsorption เท่ากับ $\bar{X} + SD, n = 3$

DPU

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation of method)

จากการทดสอบความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก โดยศึกษาที่ความยาวคลื่น 890 nm พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (The Coefficient of Correlation, r) ของวิธีนี้มีค่าเท่ากับ 0.9996 ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีความสามารถตรวจวิเคราะห์สารแม้มีค่าความเข้มข้นต่ำก็สามารถวิเคราะห์ได้ (LOD = 0.0267) จากการทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ระดับ คือ 0.2, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับวิธีการวิเคราะห์มีความแม่นยำและความเที่ยงสูง ร้อยละการกลับคืนเท่ากับ 102.85±0.78 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกิน 5% ดังนั้นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิกมีความน่าเชื่อถือเพราะมีความแม่นยำและความเที่ยงสูง

5.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟตด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟต ได้แก่ ปริมาณที่เหมาะสมของตัวดูดซับ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ และค่า pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟต

จากการทดลองการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออโธฟอสเฟต โดยทำการศึกษาหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับออโธฟอสเฟต ระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดออโธฟอสเฟต และศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟต พบว่าการใช้

แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ปริมาณ 2.0 กรัม และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาปริมาณ 0.1 กรัมเป็นตัวดูดซับเหมาะสมต่อการถูกเลือกใช้เป็นปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม เนื่องจากใช้สารในปริมาณที่น้อยแต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับออโธฟอสเฟตสูง

จากการศึกษาเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับพบว่าระยะเวลา 3 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับออโธฟอสเฟตเมื่อใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ และเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 30 นาที เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุดและหลังจากระยะเวลานี้ผ่านไปประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟตค่อนข้างคงที่ ดังนั้นการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยระยะเวลา 3 ชั่วโมง และการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์ระยะเวลา 30 นาทีจึงเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล

จากการศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟต พบว่ากระบวนการดูดซับออโธฟอสเฟตจากน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ โดยปรับ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟตมีค่าสูงสุด ดังนั้น pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์เท่ากับ 1 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ เนื่องจากเมื่อปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มาก นั่นคือตัวดูดซับสามารถดูดซับฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้บริเวณเยื่อเปลือกไข่มีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่เอมีน (NH_2^-) และหมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) ซึ่งจะเป็นประจุลบในสารละลายจึงผลักกับประจุลบของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แต่เมื่ออยู่ในสารละลายกรดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะไปจับกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย ทำให้ผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวกจับกับฟอสเฟตไอออนได้มาก และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นมีผลทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับออโธฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบลดลง ส่วน pH เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาคือ pH อยู่ในช่วง 4-11 ซึ่งในการทดลองเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา 0.1 กรัม ความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตจากน้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีค่าร้อยละ 97.34-97.59 แต่ที่ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 ส่งผลให้เกิดการละลายของตัวดูดซับ

เกิดปฏิกิริยากรด-เบส มากกว่าการดูดซับจึงส่งผลให้ร้อยละการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างลดลง ในขณะที่ pH 4, 7, 9 และ 11 หลังจากกระบวนการดูดซับ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นอยู่ในสภาวะกลางและเบส ส่งผลให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุที่พื้นผิวเป็นบวก ส่งผลให้ค่าศักย์ซีต้า (Zeta Potential) มีค่าเป็นบวกมาก จึงดูดซับกับสารละลายออโธฟอสเฟตซึ่งมีประจุเป็นลบได้ดี ส่งผลให้ร้อยละในการดูดซับออโธฟอสเฟตมีค่าสูง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ T. Ennil Kose

5.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วย $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา

จากการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟตโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา โดยใช้สมการไอโซเทอร์มมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ ที่สภาวะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟต ณ ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าเมื่อเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับออโธฟอสเฟตตามสมการของฟรุนดิชและแลงเมียร์ แล้วพิจารณาค่า R^2 เข้าใกล้ 1 ที่สุด พบว่าการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่มีความสอดคล้องกับ Freudlich Isotherm (R^2=0.9207) มากกว่า Langmuir Isotherm (R^2=0.8765) และจากการศึกษาค่าของความชัน 1/n มีค่าเท่ากับ 1.9573 ซึ่งมากกว่า 1 และค่า K_F ของการดูดซับมีค่า 3.2554 แสดงให้เห็นว่าความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มากหรือกล่าวได้ว่าบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ ทั้งนี้สรุปได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่สามารถดูดซับออโธฟอสเฟตได้และพฤติกรรมการดูดซับเป็นลักษณะการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับออโธฟอสเฟตสามารถเกิดได้บนพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ได้หลายชั้น (Multilayer) ส่วนการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผามีความสอดคล้องกับ Langmuir Isotherm (R^2=0.9456) มากกว่า Freudlich Isotherm (R^2=0.8333) โดยปริมาณการดูดซับออโธฟอสเฟตสูงสุดของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ (q_m) มีค่า 333.33 mg/g และค่า K_L ซึ่งเป็นค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียวมีค่า 1.67 L/mg เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ

5.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ $CaCO_3$ จากเปลือกไข่ และ CaO จากเปลือกไข่เผา

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำเสียปนเปื้อนฟอสเฟตจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้รับการอนุเคราะห์น้ำเสียจากการล้างภาชนะในส่วนของโรงงานผลิตขนมปัง บริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตบริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด โดยวิเคราะห์ปริมาณออโธฟอสเฟตเริ่มต้นจากน้ำเสียทั้งสองแหล่งพบว่าน้ำล้างภาชนะจากโรงงานผลิตขนมปังบริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตบริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด มีปริมาณออโธฟอสเฟตเริ่มต้น 28.26 และ 30.20 ppm ตามลำดับ เมื่อนำน้ำเสียจากทั้งสองแหล่งมากำจัดออโธฟอสเฟตด้วยการดูดซับโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่เผา พบว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับสามารถดูดซับออโธฟอสเฟตได้มากกว่าร้อยละ 99 ในขณะที่การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับสามารถดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำเสียจากทั้งสองโรงงานเพียงร้อยละ 23.67-30.46 จึงทำการปรับ pH เริ่มต้นของน้ำเสียจากทั้งสองแหล่งให้อยู่ในสภาวะกรดคือ pH เท่ากับ 4 และ 1 เพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยเปลือกไข่โดยการใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ส่งผลให้ร้อยละการดูดซับออโธฟอสเฟตเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำล้างภาชนะจากโรงงานผลิตขนมปังบริษัทจังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด มีความสามารถในการดูดซับร้อยละ 73.73±3.42 และการดูดซับออโธฟอสเฟตในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจากบริษัทกรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด มีความสามารถในการดูดซับร้อยละ 93.41±2.10 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดออโธฟอสเฟตในน้ำเสียจะมีค่ามากเมื่อน้ำเสียในแต่ละแหล่งมี pH เท่ากับ 1 เนื่องจากก่อนและหลังจากกระบวนการดูดซับน้ำเสียยังคงมี pH อยู่ในสภาวะกรดดังเดิม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการหา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับออโธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่โดยการใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ อุณหภูมิของการดูดซับ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย เป็นต้น

2. ควรศึกษาการนำวัสดุที่ดูดซับแล้วไปใช้ประโยชน์ เช่น การทำปุ๋ย เป็นต้น

3. ควรศึกษาการกำจัดออโธฟอสเฟตในน้ำเสียจากหลายๆ แหล่ง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของไอออนที่แตกต่างกันต่อกระบวนการกำจัดออโธฟอสเฟตด้วยวิธีการดูดซับ เช่น น้ำเสียจากเกษตรกรรม น้ำเสียจากครัวเรือน เป็นต้น

บรรณานุกรม

กรรณิการ์ สิริสิงห. **เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2544.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. **การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. **หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.

ยะโก๊ะ ขาเร็มดาเบะ. **การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยทักษิณ, 2533.

ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์. **การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมี่ยม.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.

วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์. “เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์.” **วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์** 2,11 (2555) : 75-83.

วิมลลักษณ์ สุตะพัณธ์. **การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิทจากเปลือกไข่ไก่.** [Online]. Available : http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/3819/1/SUT7-710-50-36-75-Fulltext.pdf (Novembet 5, 2014)

DPU

เสาวภา ชูมณี. **ศึกษาผลกระทบจากการใช้ปุ๋ยในทางเกษตรกรรม ที่มีต่อคุณภาพน้ำและดินในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักตอนบน อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์.** รายงานการวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, 2553.

Christian, G.D. **Analytical Chemistry**. 6th ed. United States of America : John Wiley&Sons,Inc., 2004.

Dhuha D. Salman, et.al. “Determination the Optimal Conditions of Methylene Blue Adsorption by the Chicken Egg Shell Membrane” **International Journal of Poultry Science.** 11(2012) : 391-396.

Elwakeel and Yousif. “Adsorption of Malathion on Thermally Treated Egg Shell Material” **Fourteenth International Water Technology Conference**, TWTC 14 (2010) : 53-65.

Nurul Aimi binti Rohaizar, et.al. “Removal of Cu(II) from Water by Adsorption on Chicken Eggshell” **International Journal of Enginerring & Technology.** 13 (2012) : 40-45.

Ramakrishnaiah C.R. and Vismitha. “Removal of Phosphate from Wastewater using Low-Cost Adsorbents” **International Journal of Enginerring Inventions.** 1 (2012) : 44-50.

Sabir Hussain, et.al. “Othophosphate removal from domestic wastewater using limestone and granular activated carbon” **Desalination.** 271 (2011) : 265-272.

Shaban El-Sayed Ghazy, et.al. “Batch Removal of Nickel by Eggshell as a Low Cost Sorbent” **Internation Journal of Industrial Chemistry.** 2 (2011) : 242-252.

Taverniers I. et.al. “Trends in quality in the analytical laboratory: II. Analytical method validation and quality assurance” **Trends in Analytical Chemistry.** 23(2004) : 535–552.

T. Ennil Kose, Betul Kivanc. “Adsorption of phosphate from aqueous solutions using calcined waste eggshell” **Chemical Engineering Journal.** 178 (2011) : 34-39.

Thi An Hang Nguyen, et.al. “Phosphorous Removal from Aqueous Solutions by Agricultural By-products: A Critical Review” **Journal of Water Sustainability.** 2 (2012) : 193-207.

DPU

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

DPU

การคำนวณหาค่าต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (Limit of Detection, LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ)

ค่าต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) สามารถคำนวณจาก Regression line ของกราฟมาตรฐาน ได้ดังนี้ (Christian, G.D.,2004)

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n-2}}$$

$$LOD = \frac{3S_{y/x}}{b}$$

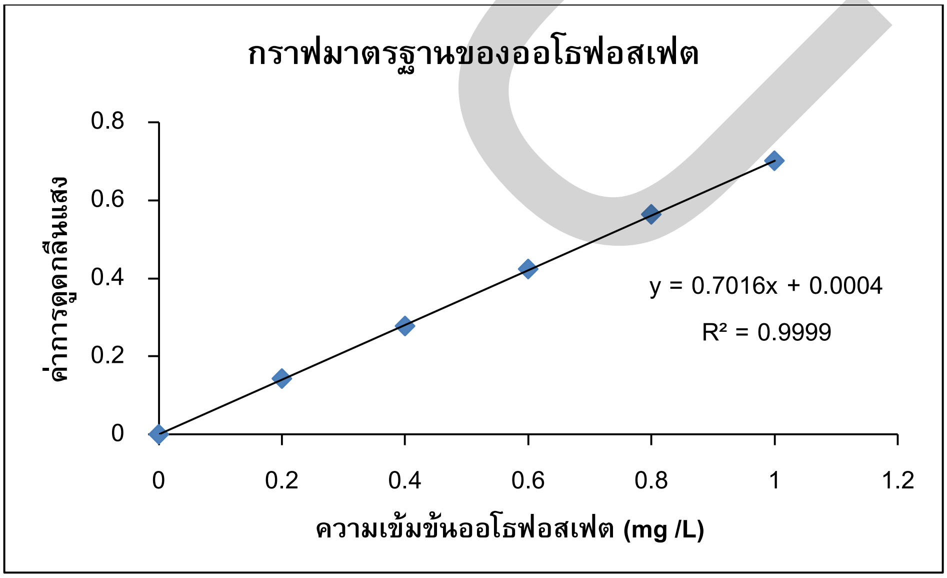
$$LOQ = \frac{10S_{y/x}}{b}$$

b คือ ความชันของสมการเส้นตรง

y_i คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวิเคราะห์จริง

$\hat{y}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่คำนวณได้จากสมการเส้นตรง

$S_{y/x}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการสร้างกราฟเส้นตรง



ภาพที่ ก-1 แสดงกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง

ตารางที่ ก-1 การคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดการวิเคราะห์ออโธฟอสเฟต

n	xi	yi	$\hat{y}$	$(yi - \hat{y})$	$(yi - \hat{y})^2$
1	0	0.000	-0.0004	0.0004	1.600×10^{-7}
2	0.2	0.143	0.1399	0.0027	7.544×10^{-6}
3	0.4	0.277	0.2802	-0.0029	8.449×10^{-6}
4	0.6	0.423	0.4206	0.0028	7.691×10^{-6}
5	0.8	0.563	0.5609	0.0024	6.019×10^{-6}
6	1.0	0.701	0.7012	-0.0005	2.844×10^{-7}
				รวม	3.015×10^{-5}

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n - 2}}$$

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{3.015 \times 10^{-5}}{6 - 2}}$$

$$= 2.746 \times 10^{-3}$$

$$LOD = \frac{3S_{y/x}}{b}$$

$$= \frac{3 \times 2.746 \times 10^{-3}}{0.7016}$$

$$= 0.0117$$

DPU

$$LOQ = \frac{10S_{y/x}}{b}$$

$$= \frac{10 \times 2.746 \times 10^{-3}}{0.7016}$$

$$= 0.0391$$

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r)

ค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (r) ของวิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นของออโธฟอสเฟตสามารถคำนวณได้ดังนี้ (Christian, G.D.,2004)

ตารางที่ ก-2 การคำนวณเพื่อหาค่าสหสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์ออโธฟอสเฟต

n	Xi	Yi	$Xi-\bar{X}$	$yi-\bar{y}$	$(Xi-\bar{X})^2$	$(yi-\bar{y})^2$	$(Xi-\bar{X})(yi-\bar{y})$
1	0	0.000	-0.5	-0.3510	0.25	0.1232	0.1755
2	0.2	0.143	-0.3	-0.2083	0.09	0.0434	0.0625
3	0.4	0.277	-0.1	0.0737	0.01	0.0054	0.0074
4	0.6	0.423	0.1	0.0723	0.01	0.0052	0.0072
5	0.8	0.563	0.3	0.2123	0.09	0.0451	0.0637
6	1	0.701	0.5	0.3497	0.25	0.1223	0.1748
รวม					0.7	0.3446	0.4911

$$r = \frac{\sum_i\left[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]}{\sqrt{\left[\sum_i(x_i-\bar{x})^2\right]\left[\sum_i(y_i-\bar{y})^2\right]}}$$

$$r = \frac{0.4911}{\sqrt{[0.7][0.3446]}}$$

$$= 1.0000$$

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลอง

DPU

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	SD
0	0	0	0	0	0
0.2	0.146	0.136	0.146	0.143	0.0058
0.4	0.278	0.276	0.278	0.277	0.0012
0.6	0.425	0.42	0.425	0.423	0.0029
0.8	0.563	0.564	0.563	0.563	0.0006
1	0.697	0.708	0.697	0.701	0.0063

DPU

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองแสดงปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ (mg /l)											
	0.5 g			1.0 g			2.0 g			5.0 g		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	96.05	98.02	99.01	97.98	92.91	93.15	83.76	80.41	78.01	83.76	79.21	89.28
10	97.49	98.75	99.37	88.56	87.59	93.39	81.13	79.21	84.96	72.01	68.18	72.97
15	94.84	97.42	98.71	100.00	83.97	83.97	85.44	73.45	84.00	66.98	65.06	66.98
20	93.87	96.94	98.47	92.42	81.80	83.01	82.81	80.17	86.40	72.73	75.61	73.21
25	94.84	97.42	98.71	88.56	82.52	81.08	73.21	79.21	82.81	83.05	85.68	74.17
30	91.94	95.97	97.99	78.66	80.35	86.15	68.18	64.10	78.01	75.61	76.57	83.05
35	93.39	95.08	97.54	85.42	80.11	75.28	70.58	80.65	84.72	72.73	70.34	75.85
40	86.87	93.44	93.77	87.59	80.59	84.70	69.62	70.58	86.64	72.49	79.21	78.25
45	95.56	97.37	96.83	79.87	78.66	81.32	75.85	78.49	75.37	77.77	77.29	72.01
50	88.08	94.04	96.01	88.56	80.59	82.04	80.17	78.49	80.41	76.81	80.89	72.73

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ผลการทดลองแสดงปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ (mg /l)											
	0.5 g			1.0 g			2.0 g			5.0 g		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
55	90.25	94.84	96.77	85.18	83.01	84.94	82.81	79.45	78.01	75.85	78.25	72.49
60	84.21	92.11	89.13	80.35	79.87	85.66	58.82	56.43	62.18	72.73	72.73	66.98
90	73.83	75.88	79.08	50.65	56.21	61.76	37.48	35.56	31.49	67.94	69.14	67.22
120	68.28	72.87	76.73	51.14	48.72	56.45	27.89	26.93	31.73	41.56	42.28	46.12
150	64.17	67.92	70.87	41.96	38.82	46.31	20.94	22.37	24.29	27.65	25.49	26.45
180	58.14	62.12	63.15	34.96	32.30	43.65	18.06	19.26	21.65	19.50	18.06	21.89
210	52.83	55.48	54.40	32.30	27.23	26.27	17.34	17.82	17.10	17.34	15.66	19.02
240	46.31	46.43	46.97	20.96	24.10	25.06	15.18	15.90	18.30	14.94	13.74	17.34
270	40.03	40.63	40.94	22.16	22.16	20.72	12.06	14.70	14.70	14.46	15.18	19.26
300	36.89	37.13	37.13	20.23	21.44	19.03	12.06	13.26	17.10	13.50	11.58	12.06
330	36.41	37.01	35.75	18.78	19.51	19.75	13.50	13.26	15.18	13.50	13.50	11.10

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองแสดงร้อยละออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ											
	0.5 g			1.0 g			2.0 g			5.0 g		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	3.95	0.00	0.00	2.02	7.09	6.85	16.24	19.59	21.99	16.24	20.79	10.72
10	2.51	0.00	0.00	11.44	12.41	6.61	18.87	20.79	0.00	27.99	31.82	27.03
15	5.16	0.00	0.00	0.00	16.03	16.03	14.56	26.55	16.00	33.02	34.94	33.02
20	6.13	0.00	0.00	7.58	18.20	16.99	17.19	19.83	13.60	27.27	24.39	26.79
25	5.16	0.00	0.00	11.44	17.48	18.92	26.79	20.79	17.19	16.95	14.32	25.83
30	8.06	0.00	0.00	21.34	19.65	13.85	31.82	35.90	21.99	24.39	23.43	16.95
35	6.61	3.23	0.00	14.58	19.89	24.72	29.42	19.35	15.28	27.27	29.66	24.15
40	13.13	4.92	5.89	12.41	19.41	15.30	30.38	29.42	14.80	27.51	20.79	21.75
45	4.44	0.82	3.71	20.13	21.34	18.68	24.15	21.51	24.63	22.23	22.71	27.99
50	11.92	0.00	2.02	11.44	19.41	17.96	19.83	21.51	19.59	23.19	19.11	27.27

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) ผลการทดลองแสดงร้อยละออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่างๆ (mg /l)											
	0.5 g			1.0 g			2.0 g			5.0 g		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
55	9.75	0.57	1.30	14.82	16.99	15.06	17.19	20.55	21.99	24.15	21.75	27.51
60	15.79	0.00	13.85	19.65	20.13	14.34	41.18	43.57	37.82	27.27	27.27	33.02
90	26.17	22.06	17.72	49.35	43.79	38.24	62.52	64.44	68.51	32.06	30.86	32.78
120	31.72	22.55	19.41	48.86	51.28	43.55	72.11	73.07	68.27	58.44	57.72	53.88
150	35.83	28.34	26.17	58.04	61.18	53.69	79.06	77.63	75.71	72.35	74.51	73.55
180	41.86	33.89	35.83	65.04	67.70	56.35	81.94	80.74	78.35	80.50	81.94	78.11
210	47.17	41.86	46.69	67.70	72.77	73.73	82.66	82.18	82.90	82.66	84.34	80.98
240	53.69	53.45	52.48	79.04	75.90	74.94	84.82	84.10	81.70	85.06	86.26	82.66
270	59.97	58.76	58.76	77.84	77.84	79.28	87.94	85.30	85.30	85.54	84.82	80.74
300	63.11	62.62	62.87	79.77	78.56	80.97	87.94	86.74	82.90	86.50	88.42	87.94
330	63.59	62.38	65.52	81.22	80.49	80.25	86.50	86.74	84.82	86.50	86.50	88.90

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองแสดงปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังจากผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา ที่ปริมาณต่าง ๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่าง ๆ (mg/l)											
	0.02 g			0.05 g			0.1 g			0.5 g		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	72.38	77.70	72.87	28.68	29.41	29.17	2.71	2.47	1.99	3.19	2.23	1.99
10	74.32	75.28	75.04	22.16	27.23	23.37	2.23	1.99	1.99	3.19	2.95	2.23
15	78.18	75.04	77.45	20.96	24.34	20.47	2.23	2.47	2.47	3.19	2.47	1.99
20	78.18	77.45	77.94	20.47	23.13	19.51	1.99	1.99	2.23	3.19	3.43	1.51
25	68.52	70.21	70.45	19.51	18.06	20.23	1.75	1.99	1.99	2.23	2.71	2.23
30	69.73	67.31	70.69	20.23	20.23	20.47	1.99	1.99	1.99	2.23	2.71	1.99
35	68.28	72.14	69.25	21.68	22.16	20.96	1.99	1.75	2.23	2.23	2.71	2.47
40	67.80	69.25	67.80	22.41	23.37	21.68	1.99	1.99	2.23	2.23	2.23	1.99
45	67.80	68.76	68.52	20.72	22.89	20.96	1.99	1.99	1.99	2.23	2.47	2.23
50	64.90	67.56	65.38	22.41	24.34	21.92	1.99	1.75	1.75	1.99	2.71	2.23
55	63.93	67.80	64.90	21.44	23.61	20.96	1.99	1.75	1.75	1.99	2.23	2.47
60	68.76	66.11	66.11	23.61	24.10	22.16	1.99	1.99	2.47	1.99	2.47	2.47

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่าง ๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่าง ๆ											
	0.02 g			0.05 g			0.1 g			0.5 g		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	27.62	22.30	27.13	71.32	70.59	70.83	97.29	97.53	98.01	96.81	97.77	98.01
10	25.68	24.72	24.96	77.84	72.77	76.63	97.77	98.01	98.01	96.81	97.05	97.77
15	21.82	24.96	22.55	79.04	75.66	79.53	97.77	97.53	97.53	96.81	97.53	98.01
20	21.82	22.55	22.06	79.53	76.87	80.49	98.01	98.01	97.77	96.81	96.57	98.49
25	31.48	29.79	29.55	80.49	81.94	79.77	98.25	98.01	98.01	97.77	97.29	97.77
30	30.27	32.69	29.31	79.77	79.77	79.53	98.01	98.01	98.01	97.77	97.29	98.01
35	31.72	27.86	30.75	78.32	77.84	79.04	98.01	98.25	97.77	97.77	97.29	97.53
40	32.20	30.75	32.20	77.59	76.63	78.32	98.01	98.01	97.77	97.77	97.77	98.01
45	32.20	31.24	31.48	79.28	77.11	79.04	98.01	98.01	98.01	97.77	97.53	97.77
50	35.10	32.44	34.62	77.59	75.66	78.08	98.01	98.25	98.25	98.01	97.29	97.77
55	36.07	32.20	35.10	78.56	76.39	79.04	98.01	98.25	98.25	98.01	97.77	97.53
60	31.24	33.89	33.89	76.39	75.90	77.84	98.01	98.01	97.53	98.01	97.53	97.53

ตารางที่ ข-6 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

เวลาการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ที่ปริมาณต่าง ๆ											
	100 mg/l				200 mg/l				300 mg/l			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	19.82	19.35	19.82	19.66±0.27	21.80	20.75	20.98	21.18±0.55	26.68	25.98	26.53	26.40±0.37
20	11.38	10.44	11.38	11.07±0.54	26.02	22.74	25.20	24.66±1.71	31.53	31.92	31.06	31.50±0.43
30	18.88	15.13	18.88	17.63±2.17	24.38	24.03	24.85	24.42±0.41	35.28	35.44	34.34	35.02±0.59
40	20.06	17.71	16.07	17.94±2.00	30.95	24.85	24.97	26.92±3.49	43.18	42.40	42.79	42.79±0.39
50	30.61	31.55	30.61	30.92±0.54	38.57	36.69	38.34	37.87±1.02	48.34	47.87	48.10	48.10±0.23
60	43.04	40.93	43.04	42.33±1.22	45.61	44.78	45.14	45.18±0.41	52.32	52.01	51.62	51.99±0.35
90	63.67	63.91	63.67	63.75±0.14	55.45	54.52	55.22	55.06±0.49	58.81	58.03	57.80	58.21±0.53
120	70.94	70.24	70.94	70.71±0.41	64.95	64.60	65.77	65.11±0.60	62.64	62.72	61.86	62.41±0.48
150	76.10	75.17	76.10	75.79±0.54	68.00	67.41	67.53	67.65±0.31	64.36	64.44	63.42	64.08±0.57
180	80.32	80.79	80.32	80.48±0.27	69.53	68.47	67.65	68.55±0.94	64.44	64.28	63.82	64.18±0.33
210	81.03	79.39	79.62	80.01±0.89	73.51	72.34	71.87	72.57±0.85	65.38	66.00	66.00	65.80±0.36
240	81.03	80.32	81.03	80.79±0.41	73.63	73.86	73.28	73.59±0.30	67.57	67.25	68.66	67.83±0.74
270	83.37	82.90	83.37	83.22±0.27	76.09	75.74	75.74	75.86±0.20	66.16	66.08	65.93	66.06±0.12
300	82.67	82.20	82.44	82.44±0.23	76.21	76.44	74.80	75.82±0.89	65.85	65.07	63.89	64.94±0.98

ตารางที่ ข-7 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา

เวลาการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ											
	100 mg/l				200 mg/l				300 mg/l			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
5	98.06	97.10	97.48	97.55±0.49	56.16	56.45	55.19	55.93±0.66	43.09	42.90	42.57	42.85±0.26
10	98.06	96.90	97.68	97.55±0.59	64.58	63.80	64.58	64.32±0.45	45.22	44.44	45.22	44.96±0.45
15	98.06	97.10	97.48	97.55±0.49	65.45	64.19	65.06	64.90±0.64	48.77	48.44	49.28	48.83±0.42
20	98.06	98.06	97.48	97.87±0.34	75.42	76.58	76.29	76.09±0.60	49.35	49.80	51.41	50.19±0.19
25	98.06	97.29	97.48	97.61±0.40	71.35	71.25	72.32	71.64±0.59	51.86	51.22	52.57	51.89±0.68
30	98.06	97.48	98.06	97.87±0.34	73.58	73.87	72.32	73.25±0.82	56.38	55.87	57.03	56.42±0.58
35	98.06	97.29	98.06	97.81±0.45	71.93	71.16	72.32	71.80±0.59	56.12	55.16	56.25	55.84±0.60
40	98.06	97.48	98.06	97.87±0.34	74.84	73.38	74.25	74.16±0.73	59.41	59.61	59.16	59.39±0.23
45	98.06	98.06	98.06	98.06±0.00	75.80	74.25	74.35	74.80±0.87	58.45	57.93	58.83	58.40±0.45
50	98.06	98.06	98.06	98.06±0.00	76.00	75.22	74.84	75.35±0.59	59.35	60.83	59.22	59.80±0.90
55	98.06	98.06	98.06	98.06±0.00	75.71	74.84	74.74	75.09±0.53	60.38	60.12	59.87	60.12±0.26
60	98.06	98.06	98.06	98.06	76.58	75.51	74.64	75.58±0.97	61.80	61.93	60.58	61.44±0.75

ตารางที่ ข-8 ผลการศึกษา pH เริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

pH เริ่มต้นของสารละลาย	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ											
	100 mg/l				200 mg/l				300 mg/l			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	86.28	87.27	86.53	86.69±0.51	78.76	79.25	78.39	78.80±0.43	78.14	77.16	80.10	78.47±1.50
4	85.30	83.82	83.33	84.15±1.02	73.97	73.23	72.98	73.39±0.51	60.60	61.50	62.65	61.59±1.03
7	70.06	68.83	71.78	70.22±1.48	57.87	55.41	59.22	57.50±1.93	50.20	49.13	48.56	49.30±0.83
9	9.59	7.87	8.60	8.69±0.86	7.84	5.38	8.95	7.39±1.82	21.60	20.29	19.80	20.56±0.93
11	8.85	6.88	6.15	7.29±1.40	6.37	4.65	7.96	6.33±1.66	22.58	21.60	18.65	20.94±2.05

ตารางที่ ข-9 ผลการศึกษา pH เริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา

pH เริ่มต้นของสารละลาย	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ											
	100 mg/l				200 mg/l				300 mg/l			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	7.81	6.06	5.31	6.39±1.29	5.63	3.63	7.01	5.42±1.70	15.52	16.27	17.03	16.27±0.75
4	97.59	97.59	98.34	97.84±0.43	73.09	69.83	70.58	71.17±1.71	38.01	37.42	36.84	37.42±0.59
7	97.34	98.34	98.34	98.01±0.58	70.33	67.57	68.45	68.79±1.41	29.56	29.31	28.23	29.04±0.71
9	97.59	98.34	98.34	98.09±0.43	63.44	66.45	64.57	64.82±1.52	26.47	25.89	27.31	26.56±0.71
11	97.34	98.34	98.34	98.01±0.58	65.32	64.82	64.57	64.90±0.38	28.56	28.23	28.73	28.51±0.26

ตารางที่ ข-10 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยแคลเซียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต จากเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ โดยไม่มีการปรับ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย

ตัวดูดซับ	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ							
	น้ำเสียจากการล้างภาชนะ (บริษัท จังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด)				น้ำเสียจากกระบวนการผลิต (บริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
CaO จากเปลือกไข่เผา	99.78	99.74	99.74	99.79±0.08	99.09	99.09	99.13	99.10±0.03
$CaCO_3$ จากเปลือกไข่	34.86	26.64	29.88	30.46±4.14	21.81	21.81	27.39	23.67±3.22

ตารางที่ ข-11 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับ โดยปรับ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย

ตัวดูดซับ	pH เริ่มต้นของน้ำเสีย	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ปริมาณต่างๆ							
		น้ำเสียจากการล้างภาชนะ (บริษัท จังเจริญขนมปัง-ลูกกวาด จำกัด)				น้ำเสียจากกระบวนการผลิต (บริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
$CaCO_3$ จากเปลือกไข่	1.16±0.03	70.72	73.02	77.44	73.73±3.42	95.43	91.24	93.57	93.41±2.09
	4.18±0.02	28.89	31.13	27.40	29.14±1.88	41.85	39.98	43.94	41.92±1.98

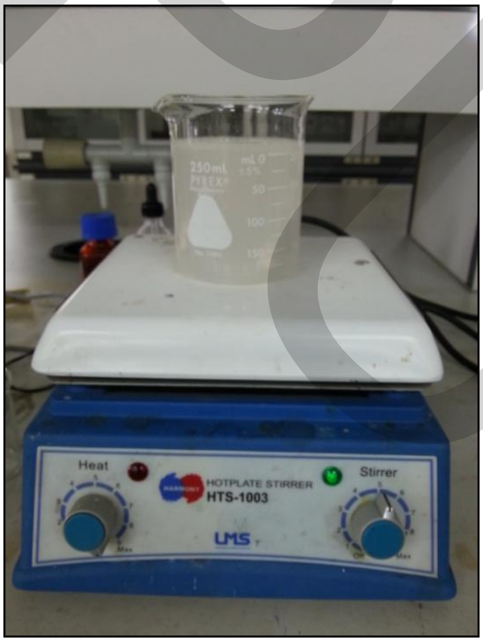
ภาคผนวก ค

เครื่องมือและอุปกรณ์

DPU

ภาพที่ ค-1 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

บริษัท Thermo Scientific (USA)



ภาพที่ ค-2 เครื่อง HTS 1003 Hotplate Magnetic Stirrer

บริษัท LMS Company (Japan)

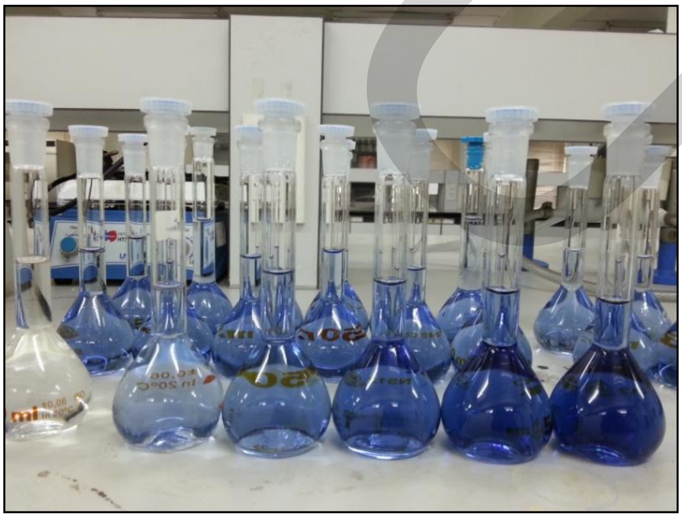
DPU

ภาพที่ ค-3 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ

ภาพที่ ค-4 เตาเผา **(**Furnace)

บริษัท Burnstead Thermolyne

ภาพที่ ค-5 เตาอบไฟฟ้า บริษัท Memmert



ภาพที่ ค-6 อุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายสำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสง

ประวัติผู้วิจัย

DPU

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นางเสาวภา ไวยสุศรี

วันเกิด : 9 ธันวาคม 2524

สถานที่เกิด : อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์

ประวัติการศึกษา : ปริญญาศึกษาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ เคมี (เกียรตินิยมอันดับ 2) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

DPU