

การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารโดยกำจัดสารอินทรีย์ละลายและฟอสฟอรัสด้วยการดูดซับโดย
ตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

นายมาชัย ณ์รัฐกูญชร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF BUILDING EFFLUENT QUALITY BY ADSORPTION OF DISSOLVED ORGANIC CARBON AND PHOSPHORUS WITH IRON OXIDE COATED ACTIVATED CARBON

Mr. Machai Nathakunchorn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

มาชัย ญัฐกฤษ : การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารโดยกำจัดสารอินทรีย์ละลายและฟอสฟอรัสด้วยการดูดซับโดยตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ (IMPROVEMENT OF BUILDING EFFLUENT QUALITY BY ADSORPTION OF DISSOLVED ORGANIC CARBON AND PHOSPHORUS WITH IRON OXIDE COATED ACTIVATED CARBON) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 160 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารโดยการบำบัดค่าซีโอดีและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับอาคาร โดยดำเนินการทดลองแบบแบ็ตช์สำหรับการหาค่าความสามารถดูดซับมากที่สุดของตัวกลางที่ใช้จากกราฟของไอโซเทอร์ม ตัวกลางที่พิจารณาเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ และการใช้คอลัมน์ตัวกลางเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์ละลายในน้ำทิ้ง โดยศึกษาผลของเวลากักเก็บของระบบโดยการปรับค่าระยะเวลาเก็บ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลงเหลือและฟอสฟอรัส

จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ในปริมาณมากกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการทดลองแบบแบ็ตช์ ส่วนเมื่อทำการทดลองแบบคอลัมน์จะพบว่าในปริมาตรเท่าๆกันถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้นานกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ สำหรับกลไกการบำบัดนั้นอาศัยกลไกการดูดซับสารฟอสฟอรัสในน้ำเป็นปัจจัยหลัก สาเหตุที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นเดียวกันก็เป็นเพราะว่าถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์มีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่มากกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ปริมาตรเท่ากัน ทั้งนี้เหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์และทรายมีสมบัติในการดูดซับฟอสฟอรัสซึ่งเกิดโดยหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะตัวอยู่บนพื้นผิวเหล็กออกไซด์ตอนสัมผัสกับน้ำ แต่ปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลแตกตัวให้ H^+ ออกมา ซึ่งส่งผลให้ค่า pH ของน้ำลดลงทราบเท่าที่ยังเกิดปฏิกิริยาดูดซับอยู่

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470333221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOSPHORUS / ADSORPTION / HYDROUS OXIDE / ฟอสฟอรัส / การดูดซับ / โลหะไฮดรอกไซด์ / สารอินทรีย์ละลาย / DISSOLVED ORGANIC MATTER

MACHAI NATHAKUNCHORN: IMPROVEMENT OF BUILDING EFFLUENT QUALITY BY ADSORPTION OF DISSOLVED ORGANIC CARBON AND PHOSPHORUS WITH IRON OXIDE COATED ACTIVATED CARBON. ADVISOR: ASSOC. PROF.CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 160 pp.

This research aims to improve treated water quality for building effluent. The studies were performed in batch-scale and column test, using iron-oxide coated activated carbon, iron-oxide coated sand, and activated carbon for treatment of phosphorus and reduction of chemical oxygen demand from treated effluent from building wastewater treatment unit. Here, the column experiment is employed to investigate the effect of hydraulic retention time on phosphorus adsorption by the above adsorbent media.

The result shows that iron-oxide coated activated carbon could adsorb phosphorus faster than that of iron-oxide coated sand in the batch experiment. For the column test, it was found that the service time of iron-oxide coated activated carbon was longer than that of iron-oxide coated sand. The main phosphorus removal phenomena is due to adsorption of phosphorus by hydrous oxide on the surface of adsorbents. Moreover, due to more iron oxide on surface of iron oxide coated activated carbon than that of iron oxide coated sand, higher phosphorus adsorption was achieved with iron oxide coated activated carbon. Hydroxyl group on the surface of iron oxide plays an important role for phosphorus adsorption, leading to yield proton or H^+ to the treated effluent. This might cause pH decrease in the treated effluent.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ รศ. ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอดเวลาและให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงข้อผิดพลาดในการออกแบบการทดลองจนทุกอย่างสำเร็จลุล่วงได้ดี ตลอดจนช่วยกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณท่านคณะกรรมการ รศ. ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล, ผศ. ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ และ อ. ดร. อรอนงค์ ลาปริสุทธิ์ ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ยืมอุปกรณ์เครื่อง Scanning Electron Microscope ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งให้กำลังใจและคำแนะนำมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณมิตรสหายที่คอยให้ความห่วงใยและความช่วยเหลือมาโดยเสมอ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	5
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	5
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวความคิด	7
2.1 น้ำเสียจากอาคารและการบำบัด.....	7
2.2 เคมีของฟอสฟอรัส.....	9
2.3 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งชุมชน	18
2.4 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption).....	22
2.5 ทฤษฎีออกไซด์ของโลหะไฮดรอกไซด์ (Hydrous Oxide Metal)	32
2.6 ถ่านกัมมันต์	37
2.7 ทบทวนเอกสาร.....	40
บทที่ 3 แผนงานและการดำเนินการวิจัย	44
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	44
3.2 การจัดเตรียมการทดลอง	44

3.3 การดำเนินการทดลอง	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	51
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางด้านไอโซเทิร์มของการดูดซับฟอสฟอรัส	51
4.2 ผลของเวลาการกักเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในชั้นคอลัมน์ตัวกลางที่ต่างกัน เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบเหล็กออกไซด์.....	93
4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตัวกลางทั้งสามชนิด ก่อนใช้งานและหลังใช้งานด้วย SEM / EDX....	108
4.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับฟอสฟอรัส	113
4.5 การเปรียบเทียบสมรรถภาพของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง 3 ชนิดในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย	114
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	120
ปัญหาและข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม	121
รายการอ้างอิง	122
ภาคผนวก.....	ก
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	ห

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 มาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	14
2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งสู่ท่อระบายน้ำเมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น	15
2.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบมาตรฐานฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งตามกฎหมายของประเทศต่างๆ	16
2.4 ตัวอย่างค่าคงที่ K และ n สำหรับสารเคมีอินทรีย์บางตัวของ Freundlich	24
2.5 ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวออกไซด์	35
3.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองความสูง	49
4.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนมวลฟอสฟอรัสต่อมวลตัวกลางของตัวกลาง	76
4.2 เปรียบเทียบค่า k ในปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางชนิดต่างๆ	78
4.3 คุณสมบัติน้ำทิ้งอาคารที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย อาคารมหิตลาริเบศรคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	79
4.4 มวลตัวกลางที่ใช้ในคอลัมน์แต่ละชั้น	93

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
2.1 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบระบบ Activated Sludge กับระบบ BMR	8
2.2 โครงสร้างของฟอสฟอรัสแดง	10
2.3 โครงสร้างของฟอสฟอรัสม่วง	10
2.4 โครงสร้างของฟอสฟอรัสดำ	11
2.5 แสดงเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในรูปแบบต่างๆ	12
2.6 เปรียบเทียบกระบวนการยูโทรฟิเคชันจากธรรมชาติกับฝีมือมนุษย์	17
2.7 การทดลองเพื่อค้นหาสิ่งทีก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่ทะเลสาบ 226	18
2.8 กระบวนการเมตาบอลิซึมของ PAO	19
2.9 ตัวอย่างการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการกำจัดฟอสฟอรัสโดย Luxury Uptake	21
2.10 กราฟที่แสดงรูปแบบของ BET isotherm	27
2.11 รูปตัดพื้นผิวออกไซด์โลหะ	32
2.12 รูปแบบที่แตกต่างกันของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวไฮดรอกไซด์	34
2.13 แบบของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว	34
2.14 ปฏิกริยาการสร้างพันธะระหว่างพื้นผิวของโลหะออกไซด์กับมลสาร	36
2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดูดซับของระบบบำบัดมลสารแบบคอลัมน์ เมื่อเวลาผ่านไป	39
3.1 ตัวอย่างแผนผังของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	46
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร	52
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ ต่อน้ำหนักทรายเคลือบเหล็กออกไซด์กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสีย	54
4.3 กราฟ $\text{Log } C_0$ กับ $\text{Log } \frac{X}{M}$ ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เวลา 60 นาที	55
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{C_0}{X/M}$ กับ C_0 ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์	56
4.5 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่กวนผสม กับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 50 g/l กับเวลา	59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร	60
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ ต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่	62
4.8 กราฟ $\text{Log } C_0$ กับ $\text{Log } \frac{X}{M}$ ของถ่านกัมมันต์ที่เวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้นต่างๆ กัน	63
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{C_0}{\frac{X}{M}}$ กับ C_0 ของถ่านกัมมันต์	64
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ที่กวนผสมกับถ่านกัมมันต์กับเวลา	66
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร	68
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ ต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์กับความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในน้ำเสียที่เหลืออยู่	70
4.13 กราฟ $\text{Log } C_0$ กับ $\text{Log } \frac{X}{M}$ ของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ ที่เวลา 60 นาที	71
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{C_0}{\frac{X}{M}}$ กับ C_0 ของถ่านกัมมันต์- เคลือบเหล็กออกไซด์ที่จุดสมดุลความเข้มข้น	72
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ที่กวนผสมกับถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ 50 g/l กับเวลา	74
4.16 กราฟ X/M ของตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์- เคลือบเหล็กออกไซด์ซึ่งคิดคำนวณเฉพาะ “เหล็กออกไซด์” ที่เคลือบ	77
4.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง โดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิดในระยะเวลา 60 นาที	81
4.18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิด	84

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำทิ้งของตัวกลาง 3 ชนิด	88
4.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการทดลองการดูดซับสารละลายมาตรฐาน- ฟอสเฟตและน้ำเสียโดยตัวกลางแต่ละชนิดในเวลา 60 นาที	91
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับปริมาณน้ำที่สามารถบำบัด- ฟอสฟอรัสให้เหลือความเข้มข้นตามมาตรฐานได้	95
4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลัมน์- สามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกันกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน	97
4.23 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนมวลของฟอสฟอรัสที่ถูกบำบัด- ต่อมวลของตัวกลางที่ HRT ต่างๆ กัน	100
4.24 กราฟเปรียบเทียบค่า COD กับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลัมน์สามารถบำบัดได้ โดยตัวกลางต่างชนิดกัน	103
4.25 กราฟเปรียบเทียบค่า pH กับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลัมน์สามารถบำบัดได้ โดยตัวกลางต่างชนิดกัน	106
4.26 กราฟเปรียบเทียบปริมาณธาตุต่างๆ บนพื้นผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนและหลังทำการทดลอง	109
4.27 กราฟเปรียบเทียบปริมาณธาตุต่างๆ ที่ตรวจพบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ก่อนและหลังทำการทำการทดลอง	110
4.28 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนและหลังนำมาใช้งาน	112
4.29 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วน X/M ที่จุด Breakthrough ของแต่ละตัวกลางที่ HRT ต่างๆ กัน	114
4.30 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำเสียที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ตามมาตรฐาน	115
4.31 เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุดของแต่ละตัวกลาง	116
4.32 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า pH น้ำออกที่ต่ำสุดและสูงสุดที่วัดได้	117
4.33 แสดงสมมูลมวลของฟอสฟอรัสในระบบการดูดซับ	118
4.34 กราฟเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลา HRT ต่างกัน	119

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียจากครัวเรือน โดยเฉพาะน้ำจากการซักล้าง มักจะมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ รวมถึงแร่ธาตุที่ปกติจะมีอยู่อย่างจำกัดในแหล่งน้ำตามธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เช่น ฟอสฟอรัส หรือ ไนเตรต ซึ่งสารเหล่านี้หากไม่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียจนต่ำกว่ามาตรฐาน ก็จะก่อให้เกิดปัญหากับแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำตามธรรมชาติหากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเป็นปริมาณมาก ผิดปกติ โดยปกติแล้วการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะนิยมใช้จุลชีพในการดึงเอาฟอสฟอรัสในน้ำไปสร้างเป็นสารให้พลังงานในเซลล์

ในขณะเดียวกัน วิธีดูดซับก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจเช่นกันสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในปัจจุบันตัวกลางดูดซับที่นิยมใช้กันมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ในรูปแบบต่างๆ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และมีสมบัติการดูดซับมลสารในน้ำได้หลากหลายชนิดอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีขีดจำกัดในการดูดซับสารละลายที่มีประจุไม่เป็นกลาง เช่น สารประกอบฟอสฟอรัสละลายน้ำ (PO_4^{3-}) อยู่บ้างก็ตาม

ในกรณีศึกษาเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลงเหลือและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจากอาคาร โดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวกรองในการปรับสภาพน้ำทิ้ง โดยเปรียบเทียบกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในสถานะเดียวกันเพื่อดูประสิทธิภาพเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางดังกล่าว เพื่อดูความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด COD และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจากอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวกลางดูดซับ โดยเปรียบเทียบกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์ ซึ่งศึกษาที่สภาวะต่างๆ อันได้แก่ระยะเวลาที่เก็บน้ำในระบบและลักษณะของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว
- 2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของธาตุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับก่อนและหลังการทดลองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของพื้นผิว รวมถึงการศึกษาไอโซเทิร์มของตัวกลางเพื่อดูพฤติกรรมการดูดซับของตัวกลาง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสารอินทรีย์หลงเหลือและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งซึ่งนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนอากาศรहितลาธิเบสร์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวกรองในการปรับสภาพน้ำทิ้ง โดยเปรียบเทียบกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในสภาวะเดียวกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบลักษณะพฤติกรรมการดูดซับของตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์
- 2) สามารถประเมินความเป็นไปได้ที่จะนำระบบที่ออกแบบขึ้นและตัวกลางชนิดใหม่ที่ทำ การทดลองไปใช้งานจริงในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคาร



บทที่ 2

ทฤษฎีและแนวความคิด

2.1 น้ำเสียจากอาคารและการบำบัด

น้ำเสียชุมชน โดยทั่วไปจะถูกกล่าวรวมๆ ถึงน้ำเสียที่ออกมาจากครัวเรือน เช่นอ่างอาบน้ำ, ส้วม, น้ำจากการล้างรถ, ซักผ้า หรือจากการทำความสะอาดครัวเรือน ซึ่งน้ำทิ้งจากครัวเรือน ในบางแห่งจะแบ่งประเภทกว้างๆ ออกเป็น Grey water และ Black water ซึ่ง Grey water นั้นเป็นน้ำที่ไม่มีสารประกอบอันตรายปะปนอยู่ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทันทีในกิจกรรมบางประเภท เช่น การรดน้ำต้นไม้ หรือการใช้เป็นน้ำชะล้างในชักโครก เป็นต้น

สำหรับ Black water นั้นจะประกอบไปด้วยสารเคมี หรือสารประกอบที่มีความเข้มข้นสูงเกินมาตรฐานน้ำที่จะสามารถนำมาใช้งานหรือดื่มกินได้ รวมไปถึงอาจจะมีสารอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตของจุลชีพที่เป็นอันตรายในน้ำ และกระบวนการปรับสภาพน้ำทิ้งชุมชนก็ถูกออกแบบมาเพื่อจัดการกับน้ำทิ้งประเภทนี้ก่อนจะปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือกลับเข้าระบบทำน้ำประปาอีกครั้ง

ระบบบำบัดน้ำเสียมักจะแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นหลายๆ ส่วนดังต่อไปนี้

2.1.1 Primary Stage หรือระบบขั้นปฐมภูมิที่ใช้ในการแยกขยะ, ของแข็งออกจากน้ำเสีย โดยการตกตะกอนในถังตกตะกอนรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงการกำจัดไขมันและขยะลอยน้ำที่จะลอยขึ้นมาบนพื้นผิวน้ำซึ่งง่ายต่อการแยกออก ซึ่งของแข็ง ไขมัน และขยะลอยน้ำเหล่านี้จะถูกแยกไปกำจัดตามกระบวนการที่เหมาะสมต่อไป

2.1.2 Secondary Stage ระบบขั้นทุติยภูมิ ในขั้นนี้จะเป็นการแยกเอาสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำออก ซึ่งมักจะทำได้โดยการใช้จุลชีพชนิดอาศัยในน้ำดึงเอาสารเหล่านั้นมาใช้ในการเจริญเติบโตก่อนจะกลายเป็นตะกอนชีวภาพซึ่งเป็นของแข็งอันง่ายต่อการกำจัดต่อไป

2.1.3 Tertiary Stage เป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบบำบัดทุติยภูมิ โดยน้ำจะนำไปผ่านกระบวนการทั้งกายภาพหรือเคมีเพื่อกำจัดสารที่ไม่พึงปรารถนา หนึ่งในกระบวนการดังกล่าวเช่นการใช้ตัวกรองทรายในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนสารประกอบอื่นๆ เช่น สารพิษละลายน้ำ จะต้องใช้กระบวนการอื่นเช่นการตกตะกอนทางเคมี หรือการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์และสารดูดซับอื่นๆ

2.1.4 ระบบบำบัดน้ำเสียจากอาคาร

สำหรับการปรับคุณภาพน้ำเสียจากอาคารนั้น ควรพิจารณาความเหมาะสมในการติดตั้งระบบและข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ ลักษณะการใช้งานอาคารดังกล่าวซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตรงกับสมบัติ

น้ำทิ้งที่ออกจากอาคาร โดยระบบที่รายงานการศึกษานี้สนใจได้แก่ระบบ BMR หรือ Biomembrane Reactor ซึ่งมีผังการทำงานโดยคร่าวๆ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งขวามือซึ่งเป็นการทดลองเปรียบเทียบระหว่างระบบ BMR กับ Activated Sludge ธรรมดา

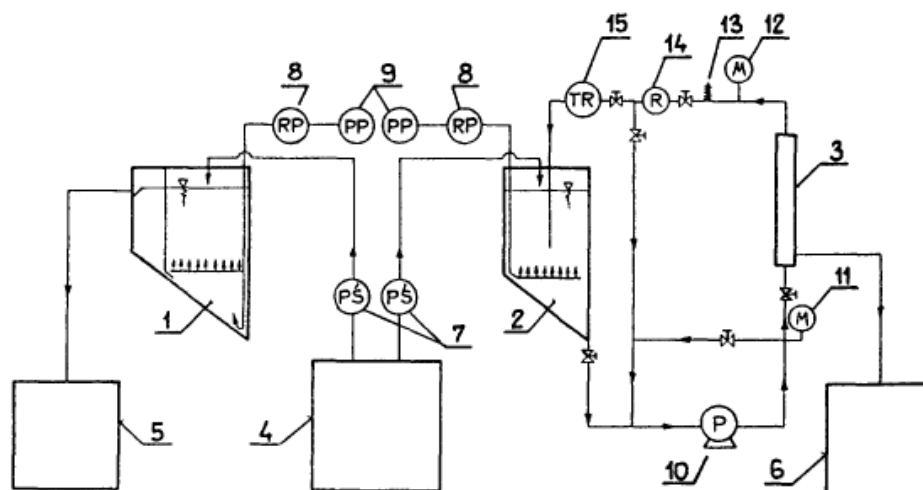


Fig. 1. Schematic diagram of the biomembrane and classical activated sludge system of wastewater treatment. 1 = Aeration tank of classical system; 2 = Aeration tank of biomembrane system; 3 = Ultrafiltration module; 4 = Raw wastewater tank; 5 = Purified wastewater tank; 6 = Permeate tank; 7 = Wastewater metering pump; 8 = Air rotameter; 9 = Aeration pumps; 10 = Impeller pump; 11, 12, = Manometers; 13 = Thermometer; 14 = De-aeration; 15 = Telerotameter.

รูปที่ 2.1 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบระบบ Activated Sludge (หมายเลข 1) กับระบบ BMR (ทางซ้ายของภาพ ถัดจากหมายเลข 4 ซึ่งเป็นถังเก็บน้ำสำหรับใช้ในการทดลองในรูป) (M. Bodzek. และคณะ, 1996)

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ BMR นี้ก็คือตัวกรองเมมเบรน ที่ถูกเพิ่มขึ้นมาเพื่อกรองตะกอนจุลินทรีย์จากระบบเติมอากาศแทนที่จะเป็นถังตกตะกอนธรรมดาทั่วไป ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบตะกอนเร่งธรรมดาทั่วไป (อ้างอิงถึงงานวิจัย M. Bodzek. และคณะ, 1996) จะพบว่าเนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการกรองตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้ระบบนี้สามารถดึงกลับตะกอนแขวนลอยได้สูงถึง 99-100% และแรงดันน้ำที่สูงขึ้นเนื่องจากการไหลผ่านตัวกรองของเมมเบรนทำให้กระบวนการเจริญเติบโตและการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงมากขึ้นจากระบบตะกอนเร่งเดิมเช่นกัน ซึ่งลักษณะเหล่านี้ส่งผลให้ระบบดังกล่าวใช้พื้นที่น้อยกว่าระบบตะกอนเร่ง เหมาะจะติดตั้งกับอาคารเป็นแห่งๆ

จากรายงานของ (S. Atkinson, 2006) ระบบ BMR เริ่มปรากฏขึ้นในช่วงทศวรรษ 1990 หากแต่เนื่องด้วยราคาเทคโนโลยีที่แพงกว่าระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ทำให้มันไม่เป็นที่เลือกที่เหมาะสมในการใช้งานจนกระทั่งในอีกประมาณ 10 ปีให้หลังที่ต้นทุนการก่อสร้างและการเดินระบบ BMR ได้ลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และเริ่มมีการใช้งานที่กว้างขวางขึ้น

2.2 เคมีของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นแร่โลหะที่มีเลขอะตอม 15 น้ำหนักอะตอม 30.97376 ซึ่งฟอสฟอรัสในธรรมชาติมักจะอยู่ในสถานะของแข็งที่ออกซิไดซ์โดยสมบูรณ์เสมอเนื่องจากความไวในการทำปฏิกิริยาของมัน ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแร่ธาตุหรือส่วนประกอบของชีวมวลในสิ่งมีชีวิตก็ตาม สำหรับสมบัติอื่นๆ เช่นจุดหลอมเหลว หรือจุดเดือดนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของฟอสฟอรัสที่จะกล่าวถึงต่อไป

2.2.1 แหล่งที่มาของฟอสฟอรัส

โดยปกติแล้วฟอสฟอรัสจะไม่พบเป็นธาตุใดๆ ในธรรมชาติ แต่จะพบอยู่ปะปนกับสินแร่ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะฟอสเฟต โดยในปัจจุบันสินแร่ที่สำคัญในการสกัดฟอสฟอรัสคือแร่พาไทต์ (apatite) ซึ่งมักจะใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับชนิดของแร่ฟอสฟอรัสนั้นก็อย่างเช่น

2.2.1.1 ฟอสฟอรัสขาว (White Phosphorus)

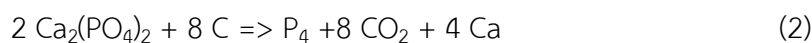
บางครั้งก็เรียก ฟอสฟอรัสเหลือง หรือ เตตระฟอสฟอรัส (P_4) เป็นโมเลกุลที่เกิดจากฟอสฟอรัสสี่อะตอมสร้างพันธะกันในรูปแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ซึ่งมีสถานะไม่เสถียร และโมเลกุลประกอบด้วยพันธะเดี่ยว P-P 6 พันธะ สำหรับผลึกของฟอสฟอรัสขาวนั้นมี 2 รูปแบบ โดยแบบแรกเรียกว่า Alpha ซึ่งเสถียรที่สถานะธรรมชาติทั่วไปเป็นรูปผลึกแบบลูกบาศก์ และสามารถเปลี่ยนรูปแบบเป็น Beta ได้เมื่ออุณหภูมิ 195.2 K. และสามารถย้อนกลับกระบวนการได้

ฟอสฟอรัสขาวจะทำปฏิกิริยากับแสงอาทิตย์และจะทำให้เปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเรืองแสงสีเขียวในที่มืดจากปฏิกิริยากับออกซิเจน นอกจากนี้ยังเป็นสารไวไฟซึ่งสามารถติดไฟได้เองเมื่อสัมผัสกับอากาศและยังมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ ดังนั้นการเก็บรักษาจึงมักแช่อยู่ในน้ำ ซึ่งฟอสฟอรัสขาวสามารถละลายได้น้อยมาก ขณะที่มันสามารถละลายได้ดีในเบนซีน, น้ำมัน, คาร์บอนไดซัลไฟด์และไดซัลเฟอร์ไดคลอไรด์

สมการการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสามารถเขียนได้ดังสมการ (1) ที่อุณหภูมิ 50°C

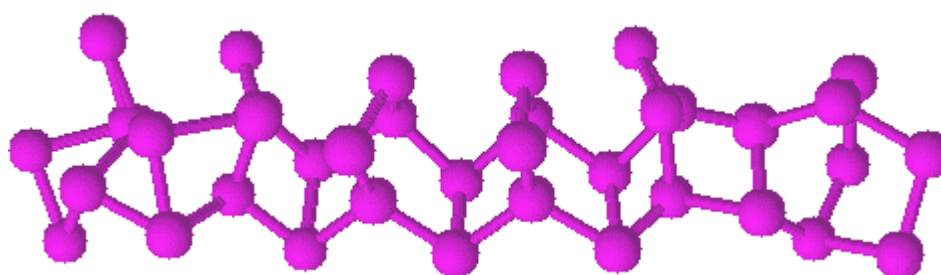


ในทางอุตสาหกรรมจะเตรียมฟอสฟอรัสขาวโดยการให้ความร้อนกับหินแร่ฟอสเฟต ผสมกับคาร์บอนและซิลิกาเพื่อระเหยฟอสฟอรัสขึ้นมาในอากาศซึ่งจะถูกดักจับโดยกรดฟอสฟอริก โดยมีสมการเคมีดังสมการที่ (2)



2.2.1.2 ฟอสฟอรัสแดง (Red Phosphorus)

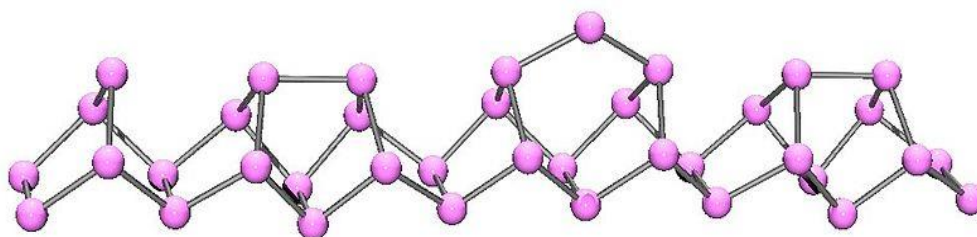
เกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนกับฟอสฟอรัสขาวที่ 250°C ขึ้นไป หรือการถูกแสงอาทิตย์ โครงสร้างของฟอสฟอรัสแดงดังรูปที่ 2.2 จะยังไม่เป็นผลึกจนกว่าจะให้ความร้อนสูงขึ้นไปอีก ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนอย่างหนึ่งคือจุดติดไฟ โดยฟอสฟอรัสแดงจะติดไฟที่ 240°C



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของฟอสฟอรัสแดง (A. Holleman and N. Wiberg., 1985)

2.2.1.3 ฟอสฟอรัสสีม่วง (Violet Phosphorus)

ฟอสฟอรัสชนิดนี้สามารถจัดเตรียมในห้องทดลองได้โดยการให้ความร้อนแก่ฟอสฟอรัสแดงที่ 550°C ในหลอดปิดเป็นเวลา 1-2 สัปดาห์ หรือละลายฟอสฟอรัสขาวในตะกั่วหลอมเหลวในหลอดปิดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงให้ตกผลึกและแยกออกจากตะกั่ว โดยละลายในกรดไนตริกแล้วต้มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ซึ่งโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 2.3



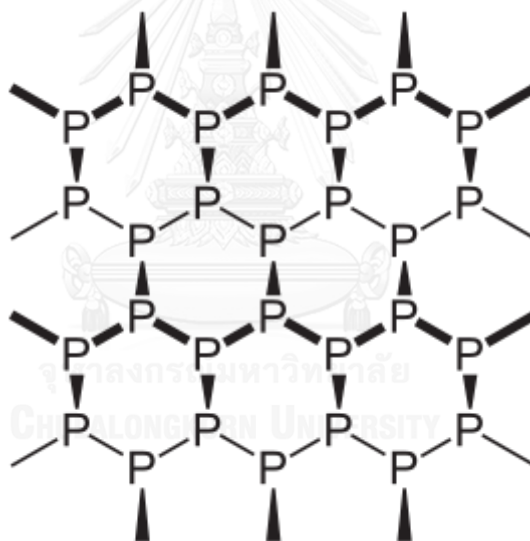
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของฟอสฟอรัสสีม่วง (A. Holleman and N. Wiberg., 1985)

สมบัติของฟอสฟอรัสชนิดนี้จะติดไฟที่อุณหภูมิมากกว่า 300°C ขึ้นไป และไม่ละลายในตัวทำละลายทุกประเภท มีปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยกับธาตุฮาโลเจน สามารถถูกออกซิไดส์กับกรดไนตริกเป็นกรดฟอสฟอริกได้

ถ้าให้ความร้อนในภาชนะปิดบรรจุก๊าซเฉื่อยเช่น ไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอสฟอรัสม่วงจะระเหิดและไอของมันสามารถควบแน่นกลับเป็นฟอสฟอรัสขาวได้ แต่หากให้ความร้อนในสุญญากาศแล้วควบแน่น จะได้ฟอสฟอรัสม่วงแทน

2.4.1.4 ฟอสฟอรัสดำ (Black Phosphorus)

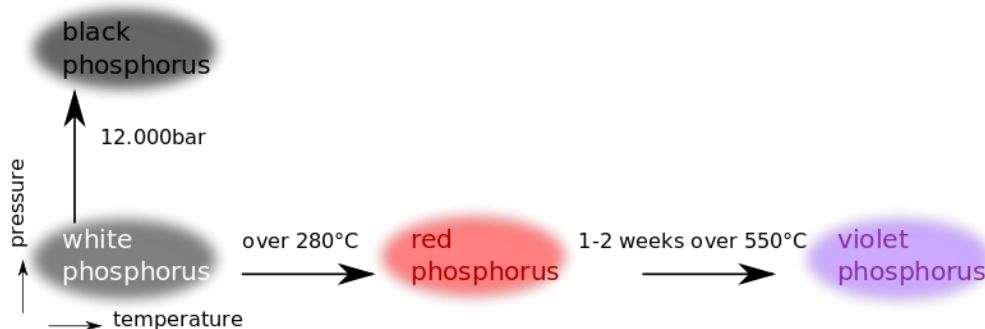
ฟอสฟอรัสดำเป็นรูปแบบของฟอสฟอรัสที่เสถียรที่สุดที่อุณหภูมิห้องและความดันที่ระดับน้ำทะเล เกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนแก่ฟอสฟอรัสขาวที่ความดันสูง (ประมาณ 12,000 บาร์) ลักษณะโครงสร้าง สมบัติจะคล้ายกับกราฟต์ สีดำ, เปราะบาง นำไฟฟ้าและมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ เป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของฟอสฟอรัสดำ (A. Holleman and N. Wiberg., 1985)

2.2.1.5 ไดฟอสฟอรัส (Diphosphorus)

ไดฟอสฟอรัส (P_2) เกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะสุดขีดเท่านั้น (เช่น ให้ความร้อน P_4 จนถึง 1100K .) ซึ่งจะเป็นสถานะก๊าซของฟอสฟอรัสซึ่งเสถียรที่อุณหภูมิ $1200 - 2000^{\circ}\text{C}$ แต่การเกิดไดฟอสฟอรัสนั้นเริ่มต้นตั้งแต่อุณหภูมิ 800°C หากแต่สัดส่วนจะน้อยอยู่ที่ประมาณ 1% เท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 2000°C ไดฟอสฟอรัสจะแตกตัวเป็นอะตอมฟอสฟอรัส



รูปที่ 2.5 แสดงเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในรูปแบบต่างๆ

(A. Holleman and N. Wiberg, 1985)

2.2.1.6 อีกแหล่งหนึ่งของฟอสฟอรัสคือสารประกอบในตัวสิ่งมีชีวิตต่างๆ เป็นสารละลายหรือสารประกอบอยู่ในดินและน้ำ ซึ่งมักจะเป็นออร์โทฟอสเฟต หรืออินทรีย์ฟอสเฟตชนิดต่างๆ ซึ่งฟอสฟอรัสอินทรีย์จะเป็นฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ที่พบในน้ำเสียชุมชนและเป็นสิ่งที่ระบบบำบัดน้ำเสียให้ความสำคัญมาก ขณะที่ฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่นๆ นั้นจะพบในอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

2.2.2 การใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัส

2.2.2.1 ปุ๋ยหรือสารปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นสารที่มีจำกัดทั้งเนื่องจากความสามารถในการละลายที่ต่ำและวัฏจักรฟอสฟอรัสที่เชิงช้า และเป็นสารจำเป็นอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นจึงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในสารปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งมักจะอยู่ในรูปของกรดฟอสฟอริก ซึ่งอาจจะมีถึง 70-75% ของ P_2O_5 ผสมอยู่

2.2.2.2 สารประกอบออร์แกโนฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารเพิ่มความยืดหยุ่น, วัสดุกันไฟ, สารกำจัดศัตรูพืช

2.2.2.3 สารประกอบในกระบวนการผลิตเหล็กกล้า หรือการผลิตสำริด แม้แต่กระบวนการหลอมทองแดงก็จะมีฟอสฟอรัสลงไปเพื่อลดความไม่บริสุทธิ์ของทองแดงหรือเพื่อการผลิตทองแดงผสมที่มีความสามารถในการนำความร้อนและไฟฟ้าที่สูงกว่าทองแดงบริสุทธิ์

2.2.2.4 ไม้ขีดไฟ

ไม้ขีดไฟที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสเริ่มมีการผลิตในทศวรรษที่ 1830 ซึ่งประกอบไปด้วยฟอสฟอรัสขาวและสารประกอบที่จะปลดปล่อยออกซิเจนเมื่อได้รับความร้อน (เช่น โพแทสเซียมคลอเรต, ไนเตรต หรือตะกั่วออกไซด์) ทาไว้ที่หัวไม้ขีด ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ในไม้ขีดยุคแรกเริ่มจะไม่เสถียรและติดไฟง่ายมากจนถูกห้ามทำการผลิตในหลายประเทศ

จนกระทั่งมีการประดิษฐ์สารติดไฟฟอสฟอรัสเฮกซะทริซิลไฟด์ (P_4S_3) ขึ้นมา ซึ่งติดไฟได้ยากจนต้องอาศัยที่ติดไฟแบบพิเศษซึ่งมีส่วนผสมของฟอสฟอรัสแดงที่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบออกซิเจนบนหัวไม้ขีดไฟให้ติดไฟเท่านั้น

2.2.2.5 การลดความกระด้างของน้ำ โดยใช้โซเดียมไทรโพลีฟอสเฟตในสารซักฟอกบางชนิด

2.2.2.6 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์อื่นๆ

- การผลิตแก้วชนิดพิเศษสำหรับใช้กับตะเกียงโซเดียม
- แก้วกระดุก, แคลเซียมฟอสเฟตใช้ในการทำเครื่องลายคราม
- กรดฟอสฟอริกจากธาตุฟอสฟอรัสใช้ในอุตสาหกรรมโซดาและเบียร์ โดยกรดดังกล่าวยังใช้ในการเตรียมสารประกอบอาหารที่ต้องใช้ฟอสเฟตด้วย เช่นผงฟูสำหรับอบขนมปัง หรือใช้ปรับปรุงคุณภาพเนื้อและเนยแข็ง หรือใช้ในยาสีฟัน
- ฟอสฟอรัสขาวใช้ในการทหารโดยเป็นส่วนประกอบในเครื่องกระสุนและระเบิด
- 32P และ 33P เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีสำหรับใช้ในห้องทดลองทางชีวภาพ

2.3.4 แหล่งสำคัญในการแพร่กระจายฟอสฟอรัสออกสู่สิ่งแวดล้อม

โดยวัฏจักรต่างๆ ไปแล้ว ฟอสฟอรัสจะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมจากการตายและย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต การชะละลายหรือการย่อยสลายของแร่ธาตุ หรือสินแร่ที่มีฟอสฟอรัสผสมอยู่ หากแต่การขยายตัวของอุตสาหกรรมและการใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุชนิดนี้ของมนุษย์ได้ทำให้เกิดแหล่งแพร่กระจายใหม่ๆ ขึ้น เช่นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือปุ๋ยที่ถูกชะละลายจากพื้นที่การเกษตรเป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้ฟอสฟอรัสในแหล่งธรรมชาติโดยมากคือแหล่งน้ำ มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สูงกว่าปกติและทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ในระยะเวลาอันสั้น

2.3.5 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องจะแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมประเทศไทย ส่วนในตารางที่ 2.2 นั้นจะเป็นมาตรฐานน้ำทิ้งสู่ระบายน้ำเมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น, 2003 ซึ่งทั้งนี้ การวิจัยนี้จะใช้ค่ามาตรฐานฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของตารางที่ 2.2 เป็นพื้นฐานการออกแบบการทดลอง โดยนำมาตรฐานฟอสฟอรัสน้ำทิ้งทั้งสองแหล่งอันได้แก่ 0.3 mg/l ของเขต Higashinada, Chuo และ Tarumi และ 0.7 mg/l ของเขตเกาะท่าเรือมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้ 0.5 mg/l แต่ค่านี้จะปัดขึ้นเป็นค่าที่วัดแต่ Organic Phosphorus เท่านั้น มิใช่ Total Phosphorus แต่ประการใด

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ประกาศกระทรวง
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัด
น้ำเสียรวมของชุมชน ลงวันที่ 7 เมษายน 2553 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป
เล่มที่ 127 ตอนพิเศษ 69ง วันที่ 2 มิถุนายน 2553

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

ท ม า ย : * กรณีหน่วยบำบัดสุดท้ายเป็นบ่อเสถียร (Stabilization Pond) หรือบ่อฝุ้ง
เหตุ (Oxidation Pond) ให้ใช้ค่าบีโอดี ของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว (Filtrate BOD) การ
กรองตัวอย่างน้ำเพื่อหาค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass
Fiber Filter Disk) ที่ใช้ในกระบวนการกรองเพื่อหาค่าของแข็งแขวนลอย
(Suspended Solids) ก่อนทำการวิเคราะห์หาค่าบีโอดีที่กำหนดไว้ใน Standard
Methods for the Examination of Water and Wastewater ฉบับล่าสุด
** กรณีหน่วยบำบัดสุดท้ายเป็นบ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond) หรือบ่อฝุ้ง
(Oxidation Pond) ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนให้เป็นไป
ตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
ฉบับล่าสุด ซึ่ง American Public Health Association, American Water
Work Association และ Water Environment Federation ร่วมกันกำหนดไว้
หรือตามวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษประกาศในราชกิจจานุเบกษา ทั้งนี้ให้
เลือกใช้วิธีวิเคราะห์ตามความเหมาะสมกับลักษณะและสภาพของตัวอย่างน้ำ

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งสู่ท่อระบายน้ำเมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น (Ministry of Environment, Government of Japan, 2003)

Items related to the protection of human health

Dioxins (Kobe city)

Items	Permissible limits
Dioxins	< 10pg-TEQ/ℓ

Other than dioxins (Kobe city)

Items	Permissible limits (< mg/ℓ)	
	Service area of sewage treatment plant	
	Higashinada, Chuo, Tarumi	Port Island
Cadmium and its compound	0.05 mg/ℓ	0.03 mg/ℓ
Cyanide compounds	0.7 mg/ℓ	0.3 mg/ℓ
Organic phosphorous compounds	0.7 mg/ℓ	0.3 mg/ℓ
Lead and its compounds	0.1 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ
Chromium (VI)	0.35 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ
Arsenic and its compounds	0.1 mg/ℓ	0.05 mg/ℓ
Mercury, alkyl mercury and mercury compounds	0.005 mg/ℓ	0.005 mg/ℓ
Alkyl mercury compounds	Not detectable	Not detectable
PCBs	0.003 mg/ℓ	0.003 mg/ℓ
Dichloromethane	0.2 mg/ℓ	0.2 mg/ℓ
Carbon tetrachloride	0.02 mg/ℓ	0.02 mg/ℓ
1,2-Dichloroethane	0.04 mg/ℓ	0.04 mg/ℓ
1,1-Dichloroethylene	0.2 mg/ℓ	0.2 mg/ℓ
cis-1,2-Dichloroethylene	0.4 mg/ℓ	0.4 mg/ℓ
1,1,1-Trichloroethane	3.0 mg/ℓ	3.0 mg/ℓ
1,1,2-Trichloroethane	0.06 mg/ℓ	0.06 mg/ℓ
Trichloroethylene	0.3 mg/ℓ	0.3 mg/ℓ
Tetrachloroethylene	0.1 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ
1,3-Dichloropropene	0.02 mg/ℓ	0.02 mg/ℓ
Thiuram	0.06 mg/ℓ	0.06 mg/ℓ
Simazine	0.03 mg/ℓ	0.03 mg/ℓ
Thiobencarb	0.2 mg/ℓ	0.2 mg/ℓ
Benzene	0.1 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ
Selenium and its compound	0.1 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ
Boron and its compound	230 mg/ℓ	230 mg/ℓ
Fluorine and its compound	15 mg/ℓ	15 mg/ℓ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบมาตรฐานฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งตามกฎหมายของประเทศต่างๆ

ประเทศ หรือผู้ออกมาตรฐาน	มาตรฐานฟอสฟอรัสน้ำทิ้ง
ไทย: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	TP 2.0 mg/l
อเมริกา: USEPA, 2012	แตกต่างกันไปตามกฎระเบียบของแต่ละมลรัฐ
รัฐ Ohio	0.5 mg/l
ยุโรป: UWWTD, 2009	1.0-2.0 mg/l
สาธารณรัฐประชาชนจีน: Water Pollution Control Act, 2011	
In General	4.0 mg/l
Public Sewer	2.0 mg/l

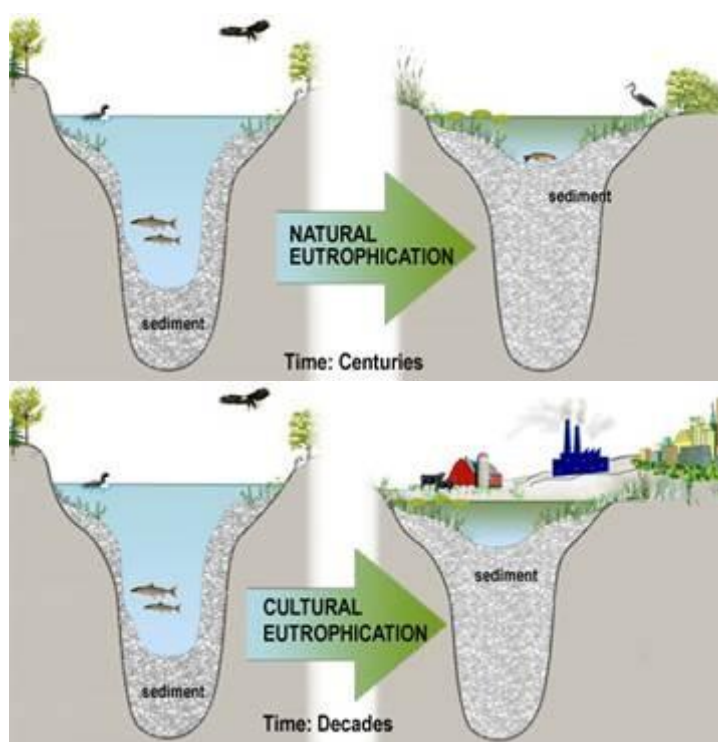
2.2.6 ปรากรูการณียูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

ปรากรูการณียูโทรฟิเคชัน เกิดขึ้นจากสารอาหารจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ฟอสฟอรัส หรือไนโตรเจน ซึ่งปกติสารเหล่านี้จะละลายอยู่ในน้ำในรูปที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมากในธรรมชาติ เกิดเพิ่มความเข้มข้นขึ้นอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้พืชในแหล่งน้ำดังกล่าวสามารถเติบโตและเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วมากผิดธรรมชาติ เมื่อชีวมวลของพืชเหล่านี้ตายลง ซากของมันก็จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียและจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาย่อยสลายดังกล่าวจะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำให้หมดลงอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่ออกซิเจนในอากาศจะละลายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้ภายในแหล่งน้ำตกอยู่ในภาวะไร้อากาศและเกิดการเน่าเสียเมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นตายลง หรือการขยายจำนวนของแพลงตอนในน้ำจะไปลดปริมาณแสงที่สามารถส่องผ่านผิวน้ำได้ให้ลดลง ทำให้สาหร่ายหรือพืชใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้และลดปริมาณออกซิเจนในน้ำอีกทางหนึ่ง ซึ่งผลกระทบของปรากรูการณียูโทรฟิเคชันจะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายลงเนื่องจากการขาดออกซิเจน

ปรากรูการณียูโทรฟิเคชันอาจเกิดขึ้นได้จากการชะละลายธาตุอาหารในดินปนเปื้อนเข้ามาในแหล่งน้ำ การตายโดยธรรมชาติของสาหร่ายและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำซึ่งจะกลายเป็นซากและถูกย่อยสลายทับถมเป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีองค์ประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่กั้นแหล่งน้ำจนกระทั่งถึงจุดที่เกิดยูโทรฟิเคชัน ซึ่งระยะเวลาที่ใช้อาจจะแตกต่างกันออกไปตามสภาพของภูมิ

ประเทศ ลักษณะและสมบัติของแหล่งน้ำดังกล่าว แต่ส่วนมากแล้วจะใช้เวลาสะสมของซากสารอินทรีย์เป็นศตวรรษก่อนปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้

แต่โดยฝีมือมนุษย์แล้ว มักจะเกิดจากปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ ซึ่งฟอสฟอรัสเหล่านี้ มักจะมาจากปุ๋ยการเกษตรที่ถูกชะละลายลงแหล่งน้ำ น้ำทิ้งจากครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมที่ผ่านการบำบัดไม่สมบูรณ์ทำให้มีธาตุอาหารหลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งปริมาณที่ถูกปล่อยลงแหล่งน้ำโดยฝีมือมนุษย์นี้มักจะทำให้ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเกิดขึ้นได้ในเวลาเพียงแค่ศตวรรษเท่านั้น



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบกระบวนการยูโทรฟิเคชันจากธรรมชาติกับฝีมือมนุษย์ สังเกตที่ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว (Stokstad Science Magazine: 2008)

ตัวอย่างหนึ่งที่พิสูจน์ให้เห็นได้ชัดว่าฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยหลักของการเกิดยูโทรฟิเคชันได้แก่ การทดลองที่ทะเลสาบหมายเลข 226 ในแคนาดา ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้ทำการกั้นแบ่งทะเลสาบออกเป็นสองส่วน โดยทั้งสองส่วนของทะเลสาบจะได้รับไนโตรเจนและคาร์บอนในปริมาณเท่าๆ กัน แต่ที่ส่วนหนึ่งจะได้รับฟอสฟอรัสขณะที่อีกส่วนจะไม่มีธาตุอาหารดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองทำให้ทราบได้แน่ชัดว่าฟอสฟอรัสมีอิทธิพลมากในปรากฏการณ์ดังกล่าวโดยการเร่งการเพิ่มจำนวนของพืชน้ำและสาหร่ายดังรูป 2.7 ที่ทะเลสาบด้านสีเขียวคือส่วนที่มีการเติมฟอสฟอรัสลงไป

กฎหมายและแรงจูงใจหลายๆ อย่างได้ถูกนำเสนอเพื่อแก้ไขและป้องกันปัญหานี้ โดยมักจะใช้การกำหนดปริมาณการปล่อยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำหนึ่งๆ เนื่องจากถึงแม้ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะสามารถย้อนกลับและฟื้นฟูได้ แต่ก็ยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ



รูปที่ 2.7 การทดลองเพื่อค้นหาสิ่งที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่ทะเลสาบ 226, แคนาดา (D.W. Schindler และคณะ 2008)

2.3 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งชุมชน

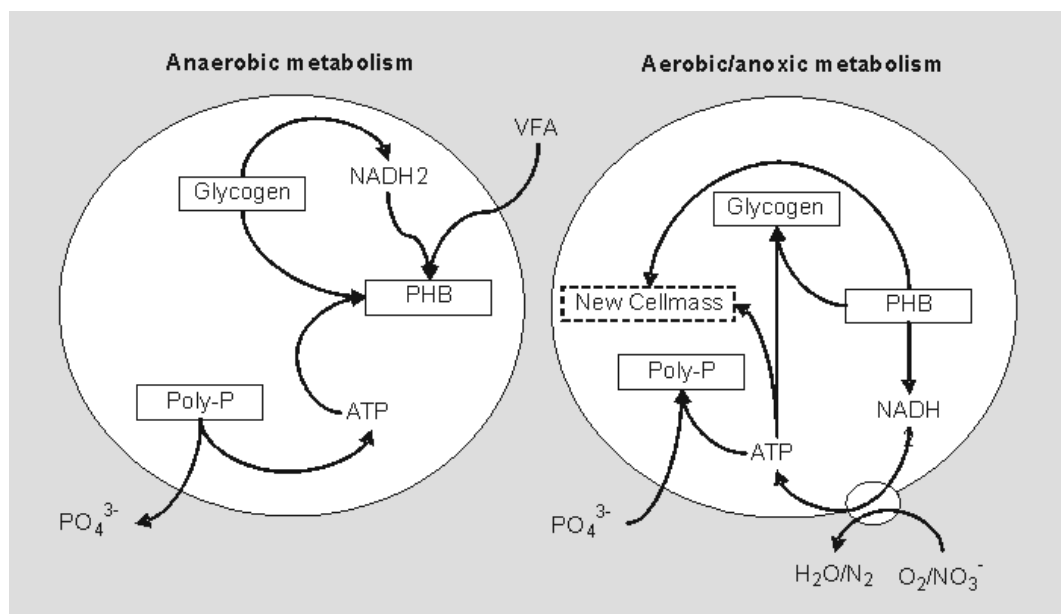
การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ทั่วไปจะมีการกำจัดออกทางตะกอนที่ถูกแยกออกจากระบบ เพราะว่ตะกอนเองจะมีอัตราส่วนมวลของฟอสฟอรัสปะปนอยู่ประมาณ 2.5% VSS ในสภาวะอุดมคติของระบบดังกล่าว ดังนั้นการกำจัดสลัดจ์หรือตะกอนชีวภาพเหล่านั้นจึงถือเป็นการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากระบบอยู่แล้วส่วนหนึ่ง

นอกเหนือจากการกำจัดออกโดยตะกอนที่ถูกแยกจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งแล้ว อีกวิธีหนึ่งในการกำจัดคือการใช้สารเคมีเพื่อทำให้ฟอสฟอรัสตกตะกอนเป็นของแข็ง แต่ค่าใช้จ่ายการเดินระบบ โดยเฉพาะค่าสารเคมีจะสูงมาก โดยเฉพาะการกำจัดตะกอนสารประกอบฟอสฟอรัสและสารเคมีภายหลังการใช้งาน และอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่าการกำจัดฟอสฟอรัสส่วนเกินทางชีวภาพ

(Biological Excess Phosphorus) ซึ่งเป็นการเดินระบบบำบัดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งจะเพิ่มอัตราส่วนมวลของฟอสฟอรัสในตะกอนชีวภาพขึ้นมากกว่าปกติ หรือที่เรียกกันว่า Luxury Uptake

2.3.1 การกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีการทางชีวภาพ

Smolders et al (1994) สรุปหลักการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ ได้ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 กระบวนการเมตาบอลิซึมของ PAO ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (ซ่าย) และสภาวะมีอากาศ (ขวา) อ้างอิงถึง (G.J.F Smolders และคณะ 1994)

- 1) เซลล์จุลชีพกลุ่ม PAO (Phosphate Accumulating Organism) จะมีการกักเก็บสารประกอบที่จำเป็นต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ 3 ชนิดอันได้แก่ polyphosphate, polyhydroxy-alkanoates และ glycogen
- 2) ในภาวะไร้อากาศ จุลชีพเหล่านี้จะดึงกรดไขมันระเหยง่ายจากของเหลวและแปลงเป็น PHB (Polyhydroxy-butyrate) ตัวกลางในกระบวนการนี้ที่สำคัญคือ NADH2 (Nicotinamide adnine dinucleotide), สารกักเก็บพลังงานที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเกิด PHB จากไกลโคเจน โดยพลังงานที่จำเป็นในกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิส Polyphosphate (Poly-P) และ ATP ที่เกิดจากการสลาย Poly-P ดังกล่าว
- 3) ภายใต้สภาวะแอนอ็อกซิก (Anoxic) หรือภาวะแอโรบิก (Aerobic) PHB ที่จุลชีพสะสมไว้ในเซลล์จะออกซิไดส์เป็น CO_2 ปลดปล่อยพลังงานในรูปของ NADH2 ซึ่งจะใช้

ในการสร้าง ATP ที่จะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตเป็นเซลล์ใหม่ ที่จะใช้ในการกักเก็บ Polyphosphate กับ Glycogen อีก

- 4) จุดแตกต่างที่สำคัญระหว่างกระบวนการในภาวะ Anoxic กับภาวะ Aerobic คือ อัตราส่วนการเกิด ATP ต่ออัตราส่วน NADH₂ ที่เป็นสารตั้งต้น โดยในสภาวะ Anoxic อัตราส่วนนี้จะต่ำกว่าประมาณ 40% ดังนั้นกระบวนการนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำลงในภาวะดังกล่าว

เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวใช้กรดไขมันระเหยง่ายเป็นหนึ่งในสารตั้งต้น การมีไนเตรตในระบบไร้อากาศจะส่งผลให้เกิดกระบวนการ denitrification โดยจุลชีพชนิดอื่นดึงกรดไขมันระเหยง่ายดังกล่าวไปใช้แทน ทำให้ไม่มีกรดไขมันระเหยง่ายเป็นสารตั้งต้นสำหรับจุลชีพชนิด PAO ใช้งานในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส ดังนั้นการออกแบบระบบกำจัดฟอสฟอรัสโดยชีวภาพนั้นจะต้องมีระบบการกำจัดไนเตรตออกไปก่อนด้วย หรือจะต้องมีระบบป้องกันไม่ให้ไนเตรตปะปนอยู่ในถังปฏิกรณ์ส่วนที่ไร้อากาศเพื่อมิให้เกิดการแย่งสารตั้งต้นกัน ซึ่งตัวอย่างการออกแบบระบบบำบัดฟอสฟอรัสก็ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

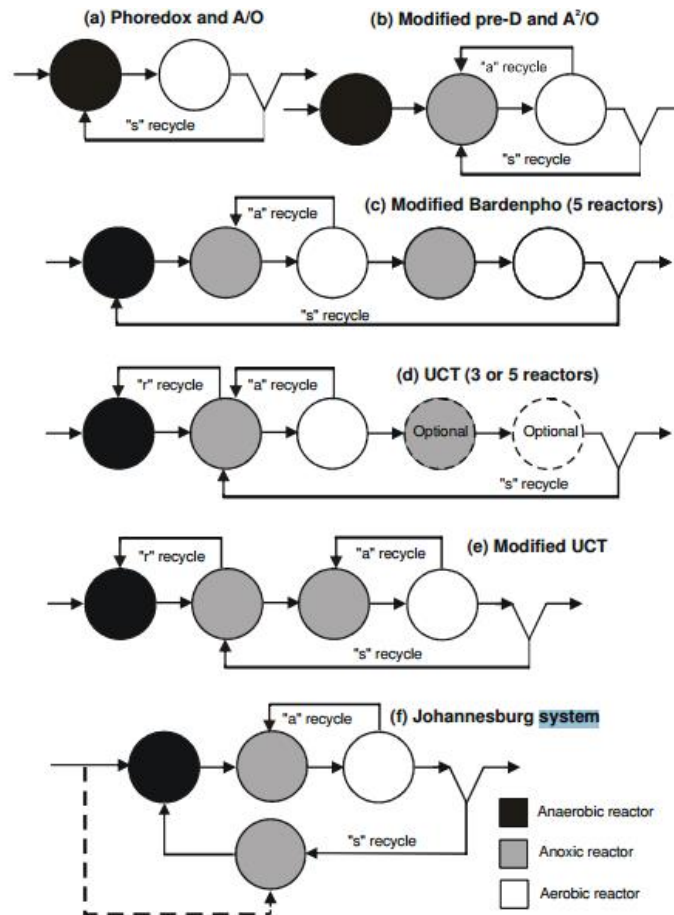


Figure 5.2 System configurations for biological phosphorus removal

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียชนิดที่มีกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสโดย Luxury Uptake (A. Van Haandel and J. van der Lubbe, 2007)

2.3.2 การกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งชุมชนโดยการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

การตกตะกอนเคมีของฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งชุมชนทำได้โดยการเติมเกลือของโลหะเข้าไป เช่น เฟอร์ริก (II) ซัลเฟต ซึ่งเกลือของโลหะดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสเกิดเป็นของแข็ง $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ หากแต่สารเคมีดังกล่าวจะมีผลกระทบกับกระบวนการไนตริฟิเคชันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า BOD และแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียอันเกิดจากการเติมสารเคมีดังกล่าว (T. Clark และคณะ- 1997) รวมถึงตะกอนทางเคมีที่ต้องการการบำบัดเฉพาะทาง มิใช่ตะกอนชีวภาพทั่วไปจากระบบบำบัดน้ำเสียดังเช่นกระบวนการ Luxury Uptake

2.4 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซมาเกาะจับและติดอยู่กับผิวของมัน ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent

การดูดติดผิวทั่วไปมี 3 รูปแบบ ได้แก่

1 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) เกิดจากแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล เช่นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ในที่นี้การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิว แต่โมเลกุลจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ ซึ่งโมเลกุลที่ดูดติดผิวจะมีข้อบกพร่องเป็นชั้นๆ บนพื้นผิวของตัวกลาง แต่การดูดติดผิวทางกายภาพเช่นนี้สามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้

2 การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นแรงกระทำที่แข็งแรงกว่าการดูดติดผิวแบบกายภาพ โดยปกติแล้วโมเลกุลจะดูดติดกับผิวของตัวกลางเพียงชั้นเดียว และโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ การดูดติดผิวทางเคมีสามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ยาก โดยทั่วไปจะต้องให้อุณหภูมิสูงแก่สารดูดติดผิวเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออกไป

3 การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) มักใช้อธิบายรูปแบบของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารกับพื้นผิว ซึ่งรวมถึงการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) ด้วย ในที่นี้ไอออนของสารจะสะสมที่พื้นผิวจากผลของไฟฟ้าสถิต นั่นคือสารจะจับกับพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้ามกับโมเลกุลของมันเท่านั้น และไอออนที่มีประจุมาก เช่นประจุบวกสาม จะมีแรงดูดสูงกว่าไอออนที่มีประจุน้อยกว่า และโมเลกุลที่มีขนาดเล็กก็จะสามารถดูดติดผิวได้ดีกว่า

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการแบ่งการดูดติดผิวออกเป็นสามจำพวกใหญ่ๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วก็ยากที่จะเจาะจงได้ว่าการดูดติดผิวของสารหนึ่งๆ ที่เราสนใจเกิดขึ้นเพราะการดูดติดผิวรูปแบบใดกันแน่

การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซึ่งอัตราเร็วและปริมาณที่สามารถดูดติดผิวได้แปรผันกับพื้นที่ผิวของของแข็งที่ใช้เป็นสารดูดติดผิว ซึ่งก็เป็นสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ได้รับความนิยมเพราะปริมาณพื้นที่ผิวต่อมวลที่สูง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะสังเคราะห์มาจากไม้ กระดูกสัตว์ หรือถ่านหิน โดยการให้ความร้อนไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ จากนั้นเผาวัตถุดิบแห้งให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 400-600 °C จากนั้นจึงไล่ยางไม้ (Tar) ออกจากถ่านด้วยความร้อน 750-950 °C ทำให้เหลือแต่ถ่านที่มีโครงสร้างรูพรุนเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว โดยที่อุณหภูมิหนึ่งและความดันหนึ่งถ่านกัมมันต์จะสามารถดูดก๊าซได้ในปริมาณที่แน่นอน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น

การดูดติดผิวของโมเลกุลสารละลายเป็นไปเช่นเดียวกับก๊าซ ซึ่งจากข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารที่สามารถดูดติดผิวกับตัวกลางได้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติวัสดุและความเข้มข้นของสารที่ต้องการดูดติดผิว

2.4.1 สมการว่าด้วยการอธิบายปรากฏการณ์ดูดติดผิว

Freundlich ศึกษาปรากฏการณ์ดูดติดผิวและได้แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของสารละลายจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $q = KC^{\frac{1}{n}}$ (1)

โดย C = ความเข้มข้นของโมเลกุลสารปนเปื้อนภายหลังการดูดติดผิว

q = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ใช้ดูดติดผิว

K และ n เป็นค่าคงที่ของสารแต่ละชนิดและอุณหภูมิ

สมการสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\text{Log } q = \text{log } K + \left(\frac{1}{n}\right) \text{log } C \quad (2)$$

ซึ่งเมื่อเขียนกราฟตามสมการ (2) ก็จะได้วิธีที่สะดวกและนิยมใช้ในการหาความสามารถในการกำจัดมลสารในสารละลาย รวมถึงค่าคงที่ K และ n

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าคงที่ K และ n สำหรับสารเคมีอินทรีย์บางตัวของ Freundlich (D.O.Cooney,1998)

สารประกอบ	pH*	K	1/n	ค่าเบี่ยงเบน
Aldrin	5.3	651	0.92	0.97
Anthracene	5.3	376	0.7	0.99
Benzene	5.3	1.0	1.6	0.97
Benzoic Acid	3.0	51	0.42	0.99
	7.0	0.76	1.8	0.91
	9.0	0.0008	4.3	0.86
Bromoform	5.3	19.6	0.52	0.98
Carbontetrachloride	5.3	11.1	0.83	0.99
Chlorobenzene	7.4	91	0.99	0.98
Chlordane	5.3	245	0.38	0.95
Chloroform	5.3	2.6	0.73	0.98
2-Chlorophenol	3.0, 5.8,	51.0	0.41	0.97
Cyclohexanone	9.0	6.2	0.75	0.84
DDT	7.3	322	0.50	0.89
1,3-Dichlorobenzene	5.3	118	0.45	0.86
1,1-Dichloroethane	5.1	1.79	0.53	0.96
2,4-Dichlorophenol	5.3	147	0.35	0.96
	3.0	157	0.15	0.96
	5.3	141	0.29	0.96
Dieldrin	9.0	606	0.51	0.94
2,4-Dinitrophenol	5.3	160	0.37	0.99
	3.0	33	0.61	0.89
	7.0	41	0.25	0.87
Diphenylamine	9.0	123\0	0.31	0.98
	3.0,7.0, 9.0			

*หากมีค่า K และ 1/n ค่าเดียวสำหรับค่า pH หลายตัว แปลว่าค่า pH ไม่มีผลมากต่อการดูดซับสารดังกล่าว

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าคงที่ K และ n สำหรับสารเคมีอินทรีย์บางตัวของ Freundlich (ต่อ)
(D.O.Cooney, 1998)

สารประกอบ	pH*	K	1/n	ค่าเบี่ยงเบน
Endrin	5.3	666	0.80	0.95
Ethylbenzene	7.3	53	0.79	0.96
Heptachlor	5.3	1220	0.95	0.78
Lindane	5.3	256	0.49	0.99
Methylene chloride	5.8	1.3	1.16	0.96
Naphthalene	5.6	132	0.42	0.96
β-Naphthol	3.0, 7.0, 9.0	200	0.26	0.89
Nitrobenzene	7.5	68	0.43	0.97
2-Nitrophenol	3.0	101	0.26	0.99
	5.5	99	0.34	0.97
	9.0	85	0.39	0.97
PCB 1221	5.3	242	0.70	0.99
Pentachlorophenol	3.0	260	0.39	0.98
	7.0	150	0.42	0.98
	9.0	100	0.41	0.98
Phenol	3.0, 7.0, 9.0	21	0.54	0.89
Styrene	3.0, 7.0, 9.0	120	0.56	0.98
Toluene	5.6	26.1	0.44	0.89
Trichloroethylene	5.3	28	0.62	0.99
p-Xylene	7.3	85	0.19	0.93

*หากมีค่า K และ 1/n ค่าเดียวสำหรับค่า pH หลายตัว แปลว่าค่า pH ไม่มีผลมากต่อการดูดซับสารดังกล่าว

สมการอื่นๆ ที่ใช้อธิบายการดูดติดผิวและหามาจากการพิจารณาตามหลักการพื้นฐานได้แก่ สมการ Langmir Isotherm และ BET Isotherm ซึ่งเป็นเหมือนส่วนขยายของ Langmir Isotherm โดยสมการ Langmir จะตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นโมเลกุลเดี่ยว (Single Layer Adsorption) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{C}{q} = \frac{a}{q_m} + \frac{C}{q_m} \quad (3)$$

เมื่อ C มีค่ามากเทียบเท่ากับค่าคงที่ a ค่า q_m จะแสดงค่าการดูดติดผิวสูงสุด เมื่อ q มีค่าใกล้เคียงกับ q_m โมเลกุลจะถูกดูดติดผิวครอบคลุมพื้นผิวเกือบทั้งหมด ถ้าเขียนกราฟของ C/q และ C จะได้กราฟเป็นเส้นตรงและสามารถหาค่าของ a และ q_m ได้

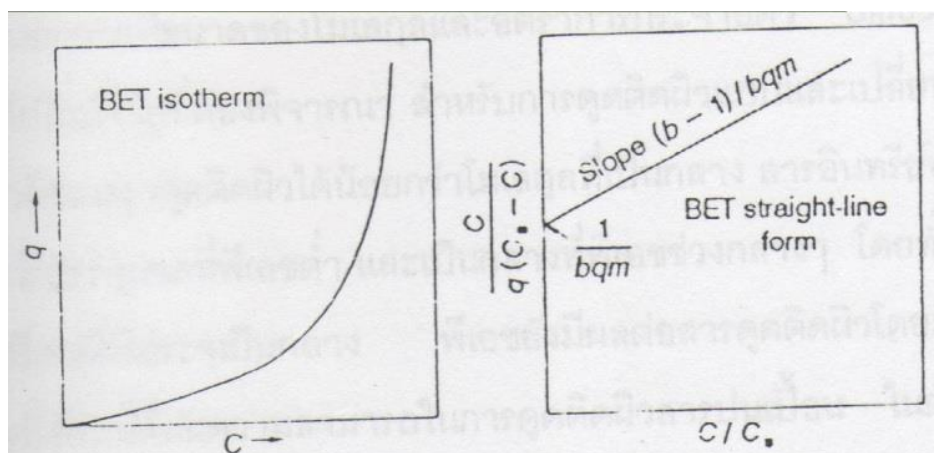
ส่วน BET Isotherm เป็นสมการดูดติดผิวที่เป็นส่วนขยายของสมการ Langmir และใช้กับการดูดติดผิวหลายชั้น แบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ชั้นของมลสารสะสมที่พื้นผิวของตัวกลางดูดซับและใช้สมการ Langmir จัดรูปใหม่ดังนี้

$$\frac{q}{q_m} = \frac{bC}{(C_s - C)[1 - (b-1)C/C_s]} \quad (4)$$

ค่า C_s แสดงค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของสารปนเปื้อนในสารละลาย เมื่อ C มีค่ามากกว่า C_s มากๆ สารปนเปื้อนจะตกผลึกหรือชั้นขึ้นเป็นของแข็งหรือของเหลวบนพื้นผิว และสามารถเขียนสมการ BET ได้เป็น

$$\frac{C}{q(C_s - C)} = \frac{1}{bq_m} + \frac{(b-1)(C/C_s)}{bq_m} \quad (5)$$

ค่า C_s และ b สามารถหาได้จากค่าความชันและจุดตัดของเส้นตรง จากกราฟซึ่งเขียนโดยใช้พจน์ซ้ายของสมการ (5) และ C/C_s กราฟของ BET Isotherm และกราฟเส้นตรง



รูปที่ 2.10 กราฟที่แสดงรูปแบบของ BET isotherm (C. N. Sawyer, P.L. McCarty and G.F. Parkin, 1994)

Adsorption Isotherm เป็นสมการสมดุลใช้กับสถานะที่เป็นผลหลังจากโมเลกุลของมลสารมีการสัมผัสกับตัวกลางดูดซับเป็นเวลานานพอที่จะเกิดสมดุลแล้ว อัตราซึ่งมลสารถูกดูดซับที่ผิวของแข็งเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณากระบวนการกำจัดมลสารออกจากก๊าซหรือของเหลว ซึ่งอัตราการดูดซับมลสารจะถูกจำกัดที่ลำดับขั้นตอนการดูดซับผิวอันใดอันหนึ่งในสามขั้นตอนที่ได้แก่ การเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มบางๆ ของน้ำที่ล้อมรอบตัวกลาง, ขั้นตอนการแพร่ของมลสารเข้าไปในรูพรุนของตัวกลาง และขั้นตอนการเกาะติดผิวของมลสารกับตัวกลาง

อัตราการเคลื่อนที่ของมลสารผ่านชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางอยู่นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยโดยการทำให้อุณหภูมิของเหลวเกิดความปั่นป่วนอันจะส่งผลให้ชั้นฟิล์มน้ำบางลงไป หากแต่จะบางลงได้เพียงใดนั้นก็ขึ้นกับสมบัติของตัวกลางดูดซับดังกล่าว

สำหรับการดูดซับมลสารด้วยถ่านกัมมันต์นั้น อัตราและปริมาณการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะสมบัติโมเลกุลของมลสาร เช่น การละลายน้ำได้ของมลสารเอง โดยสารที่ละลายน้ำได้ไม่ดีนั้นจะสามารถดูดซับได้ดีกว่า นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลมลสารและ สำหรับการดูดซับผิวแบบแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) ไอออนจะดูดซับได้น้อยกว่าโมเลกุลที่เป็นกลาง โดยสารอินทรีย์หลายชนิดจะมีประจุเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับค่าพีเอช นอกจากนี้ในน้ำ หรือน้ำเสียจะมีสารประกอบหลายชนิดปะปนกันอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้อาจจะแย่งกันดูดซับผิวกับตัวกลางทำให้อัตราการกำจัดแตกต่างกันออกไป

การใช้งานกระบวนการดูดซับผิวในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่สำคัญประการหนึ่งคือการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำและน้ำเสียต่างๆ ทั้งจากอุตสาหกรรมและระบบบำบัดน้ำเสีย

2.4.2 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetic)

ในการดูดซับมลสารของตัวกลางหนึ่งๆ ในระบบแบบทีละเท (Batch) อนุภาคของมลสารจะต้องเคลื่อนที่ผ่าน “ชั้นฟิล์มบางๆ” ของของไหลซึ่งห่อหุ้มอยู่โดยรอบอนุภาคของตัวกลางดูดซับเสียก่อนเพื่อเข้าไปให้ถึงตัวอนุภาค ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายมวลสารผ่านของไหลที่ห่อหุ้มอนุภาคตัวกลางดังกล่าวได้ด้วยสมการ (6) นี้

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = k_f S_0 (C - C_i) \quad (6)$$

โดย \bar{q} คือค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของมลสารในของแข็ง (ตัวกลางดูดซับ)

C คือความเข้มข้นของมลสารที่อยู่ในของเหลวรอบตัวกลาง

C_i คือความเข้มข้นมลสารที่บริเวณชั้นฟิล์มระหว่างอนุภาคตัวกลางกับของเหลว

S_0 คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวภายนอกของตัวกลางดูดซับเทียบกับปริมาตรของตัวกลางดูดซับดังกล่าว

และ k_f คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างฟิล์ม สมการดังกล่าวมักจะเรียกกันว่า “Linear Driving Force Rate Law”

เมื่ออนุภาคมลสารสามารถผ่านชั้นฟิล์มของเหลวที่อยู่รอบอนุภาคตัวกลางดูดซับเข้ามาได้แล้ว ก็จะมาสู่ขั้นตอนการแพร่ของมลสารเข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับเพื่อยึดเกาะกับพื้นผิวของอนุภาคตัวกลาง ซึ่งหากตั้งสมมุติฐานไว้ว่าความสามารถในการแพร่นั้นคงที่เท่ากันหมดทุกพื้นที่ในรูพรุนของอนุภาคตัวกลาง เราก็จะได้สมการพื้นฐานการแพร่ในรูพรุนของตัวดูดซับว่า

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (7)$$

โดย D_s แทนค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการแพร่ของมลสารในตัวกลาง

ค่า r แทนค่ารัศมีของทรงกลมจำลองของอนุภาคตัวกลางดังกล่าว

ส่วนค่า \bar{q} นั้นสามารถหาได้หากว่าเราสามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของมลสารที่อยู่ในสารละลายรอบตัวกลางดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ ได้ จากกฎทรงมวล

$$V(C_0 - C) = W\bar{q} \quad (8)$$

โดย C_0 เป็นค่าความเข้มข้นของมลสารตั้งต้นในสารละลาย

C คือความเข้มข้นดังกล่าวที่เวลาหนึ่งๆ ภายหลัง

V คือปริมาตรสารละลาย

W คือมวลของตัวกลางดูดซับดังกล่าว

หากคิดที่ระยะเวลาสั้นๆ หรืออัตราส่วนระหว่างสารที่ถูกดูดซับเข้าไปในของแข็งในช่วงเวลาสั้นๆ ต่อสารที่ถูกดูดซับเข้าไปที่เวลาอนันต์ (หรืออีกนัยหนึ่ง ที่สมดุล) หรือค่า $\frac{\bar{q}}{q_\infty}$ น้อยกว่า 0.3 จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\bar{q}}{q_\infty} = 6\left(\frac{D_s t}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\pi^{\frac{-1}{2}} + L\right] \quad (9)$$

โดย L เป็นค่าคงที่ ซึ่งจากสมการที่ 2.5.2-3 ดังกล่าวจะสามารถสร้างกราฟเส้นตรงระหว่างค่า $\frac{\bar{q}}{q_\infty}$ กับค่ารากที่สองของเวลา t ได้ซึ่งจะมีค่าความชันเป็น $6\left(\frac{D_s}{\pi R^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ ซึ่งจะทำให้หาค่า D_s อันเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของมลสารเข้าไปในของแข็งได้ ซึ่งค่า $\frac{\bar{q}}{q_\infty}$ ที่เวลา t หนึ่งๆ สามารถหาได้จาก การทดลองแบบ *Batch* ของตัวกลางกับมลสารละลายในน้ำ

2.4.3 อันดับของปฏิกิริยา (Reaction Order)

ในจลนศาสตร์การดูดซับ อันดับของปฏิกิริยาคือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปสมการดัง (10)

$$r = -k[C]^n \quad (10)$$

โดย r คืออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งได้คือ $\frac{dC}{dt}$

$[C]$ คือความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา

n คืออันดับของปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา

อันดับการเกิดปฏิกิริยาที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่จะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ Zeroth Order, First Order และ Second Order ซึ่งการคำนวณหาว่าปฏิกิริยาหนึ่งๆ จะเป็นปฏิกิริยาประเภทใดนั้นสามารถกระทำได้โดยการอินทิเกรตสมการ (10) ที่กล่าวไปเบื้องต้น สำหรับอันดับปฏิกิริยาสามประเภทหลักนั้นจะมีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

2.4.3 ก) Zeroth Order Reaction

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์คือปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น กล่าวคือสมการปฏิกิริยาจะเป็นดังสมการที่ (11)

$$r = -k[C]^0 = -k \quad (11)$$

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้นเมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลาแล้วจะได้เป็นกราฟเส้นตรงซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $-k$

2.4.3 ข) First Order Reaction

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาหนึ่งๆ จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ เวลานั้น กล่าวคือสมการปฏิกิริยาจะเป็นดังสมการที่ (12)

$$r = -k[C]^1 = -k[C] \quad (12)$$

หากสมมุติว่าปฏิกิริยานี้วัดจากระยะเวลา 0 ถึง t เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (12) จาก $t=0$ ถึง $t=t$ และจัดรูปสมการใหม่เราจะได้สมการ (13)

$$\ln C = \ln C_0 - kt \quad (13)$$

จากสมการดังกล่าวเราจะสามารถสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln C$ กับเวลา t ได้โดยมีจุดตัดแกน Y เป็น $\ln C_0$ และความชันเป็น $-k$

2.4.3 ค) Second Order Reaction

ปฏิกิริยาอันดับสองคือปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ เวลาหนึ่งๆ จะขึ้นกับกำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้นในปฏิกิริยา ณ เวลาดังกล่าว หรือขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิดในปฏิกิริยา ณ เวลาดังกล่าว กล่าวคือลักษณะสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ เวลาหนึ่งๆ จะเป็นดังสมการที่ (14) หรือ (15)

$$r = -k[C]^2 \quad (14)$$

$$r = -k[A]^1[B]^1 \quad (15)$$

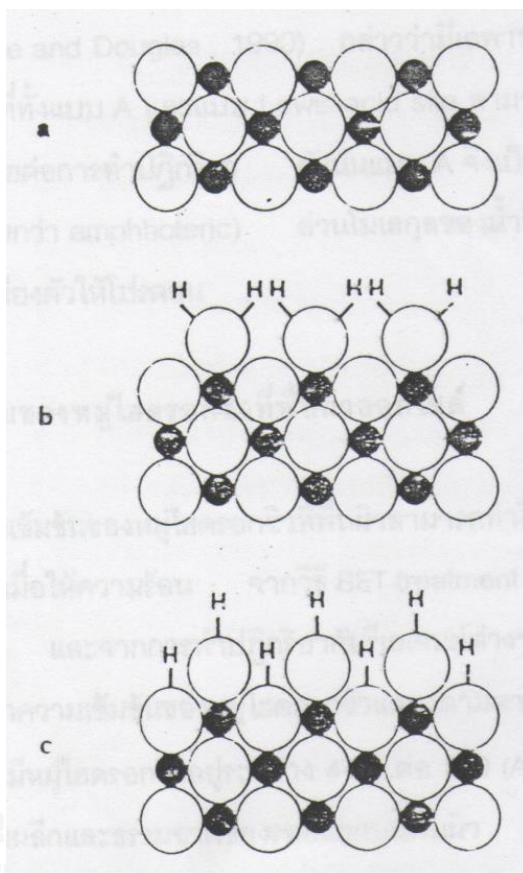
หากเราใช้ปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นซึ่งมีอิทธิพลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพียงหนึ่งชนิดในการคำนวณ สมมติว่าปฏิกิริยานี้วัดจากระยะเวลา 0 ถึง t เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (14) จาก $t = 0$ ถึง $t = t$ เราจะจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} - kt \quad (16)$$

จากสมการดังกล่าวเราจะสามารถสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\frac{1}{C}$ กับเวลา t ได้โดยมีจุดตัดแกน Y เป็นค่า $\frac{1}{C_0}$ และความชันเป็น $-k$ ซึ่งจากสมการเหล่านี้เราจะสามารถพิจารณาได้ว่าปฏิกิริยาหนึ่งๆ เป็นปฏิกิริยาชนิดไหนบ้าง

2.5 ทฤษฎีออกไซด์ของโลหะไฮดรรัส (Hydrous Oxide Metal)

ออกไซด์ของธาตุหลายชนิด เช่น ซิลิคอน อะลูมิเนียมและเหล็ก โดยทั่วไปแล้วหากถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำก็จะเกิดหมู่ไฮดรอกซิลปกคลุมบนพื้นผิวของโลหะ ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 รูปตัดพื้นผิวออกไซด์โลหะ โดยจุดดำแทนไอออนของโลหะ ขณะที่จุดขาวคือไอออนของออกไซด์ (M.A. Anderson and A.J. Rubin, 1981) โดย

- ไอออนที่ผิวอยู่ในลักษณะต่างๆ ไป
- ในสถานะที่มีน้ำไอออนที่ผิวจะจับคู่กับโมเลกุลของน้ำ
- การดูดติดผิวทางเคมีก่อให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลปกคลุมพื้นผิว

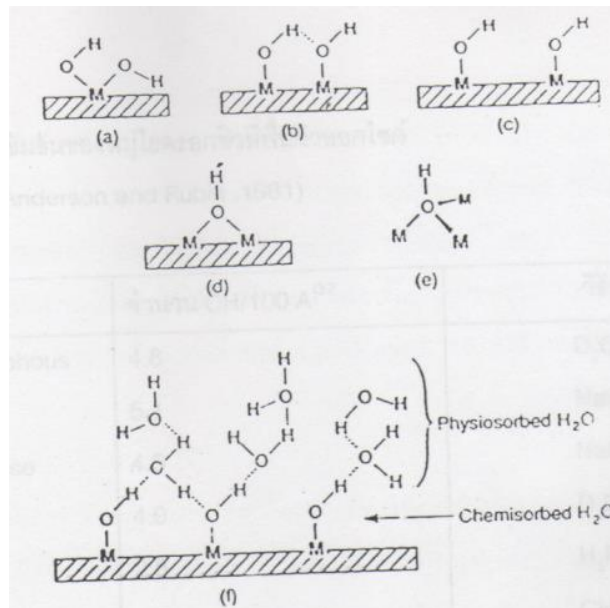
2.5.2 รูปแบบของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวสัมผัสของออกไซด์และน้ำ

จากการเกิดความไม่สมดุลของแรงทางเคมีที่ผิวสัมผัส จึงทำให้เกิดการดูดติดผิวทางเคมีกับโมเลกุลของน้ำและเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว นอกจากนี้ยังเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นชั้นของการดูดติดผิวทางกายภาพ รูปแบบที่หลากหลายของหมู่ไฮดร

อกซิลที่พื้นผิวแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งรูปแบบที่หลากหลายของหมู่ไฮดรอกซิลก็เป็นผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกันด้วย (อ้างถึงใน Jame and Douglas, 1990) จากการตรวจสอบ Geothite (Alpha-FeOOH) พบว่ามีรูปแบบต่างกัน 4 แบบ ดังแสดงในรูป 2.13 ซึ่งประกอบด้วยแบบ A, B, C และ Lewis-acid site แต่จะมีเฉพาะแบบ A เท่านั้นที่จะเกิดคอมเพล็กซ์กับไฮโดรเจนไอออน ขณะที่แบบ A และ Lewis-acid site จะสามารถปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนได้ ส่วนแบบ B และ C นั้นเมื่อต่อปฏิกิริยา ดังนั้นแบบ A จึงสามารถให้โปรตอนและรับโปรตอนได้ ขณะที่หมู่ไฮดรอกซิลแบบ Lewis-acid site จะทำได้เพียงให้โปรตอนเท่านั้น

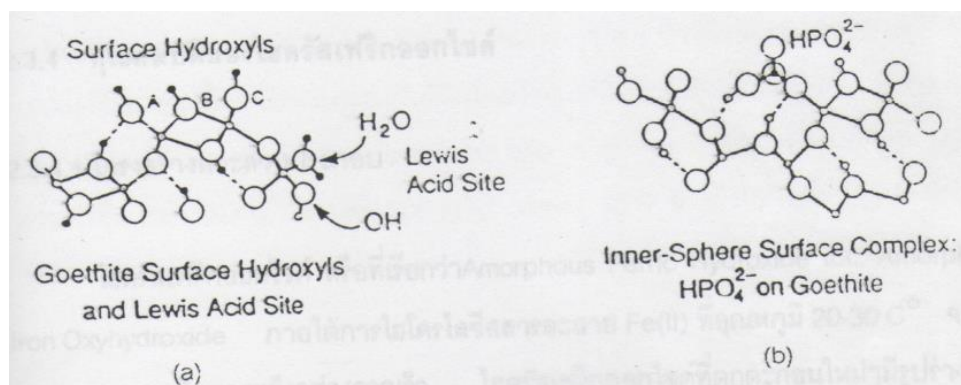
2.5.3 ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวออกไซด์

การหาความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การประมาณน้ำหนักที่หายไปเมื่อได้รับความร้อน จากวิธี BET treatment ของการดูดซับไอน้ำ จากวิธี D₂O exchange และจากการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ เช่น HClO₄, H₃PO₄, NaOH และ CH₃Mgl ค่าความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลแสดงตามตารางที่ 2.5.3 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวออกไซด์ส่วนใหญ่จะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ระหว่าง 4-10 ต่อ 100 (Å)² จำนวนที่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างผลึกและธรรมชาติของรอยแยกที่พื้นผิว นอกจากนี้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของออกไซด์ชนิดต่างๆ ยังมีความแตกต่างกันตามอัตราการเกิด Hydroxy (Hydroxylation) และอัตราการลด Hydroxy (Dehydroxylation) อีกด้วย เช่นกระบวนการของ SiO₂ จะช้า ขณะที่หมู่ไฮดรอกซิลของ Alpha-FeOOH, R-Al₂O₃ และ ThO₂ จะเกิดได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.12 รูปแบบที่แตกต่างกันของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวไฮดรอกไซด์ (Jame and Douglas, 1990)

- Geminal hydroxyl group
- Vicinal group, H-horned
- Doubly coordinate hydroxyl
- Triply coordinate hydroxyl
- Isolated hydroxyl
- ความสัมพันธ์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวซึ่งประกอบด้วย chemisorbed H_2O และ physisorbed H_2O



รูปที่ 2.13

- แบบของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว Goethite (Alpha-FeOOH) ประกอบด้วย A, B, C และ Lewis-acid site (ไม่ได้แสดงพันธะ Fe-O บางชนิดของแบบ A และ B ในภาพ)
- การดูดติดผิวของฟอสเฟตกับแบบ A ที่พื้นผิว Goethite (Jame and Douglas, 1990)

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวออกไซด์ (M.A. Anderson and A.J. Rubin, 1981)

Oxide	จำนวนหมู่ OH ต่อพื้นที่ 100 \AA^2	Method of measurement
SiO ₂ amorphous	4.8	D ₂ O
	5.1	NaOH
TiO ₂ anatase	4.5	NaOH
	4.9	D ₂ O
	2.8	H ₃ PO ₄
CeO ₂	4.3	CH ₂ N ₂
SnO ₂	2.0	CH ₂ N ₂
η -Al ₂ O ₃	4.8	CH ₃ Mg
γ -Al ₂ O ₃	10.0	Weight loss
α -Fe ₂ O ₃	5.5	BET
	9.1	CH ₂ N ₂
ZnO	6.8-7.5	BET

2.5.4 สมบัติของไฮดรอกไซด์เฟอริกออกไซด์

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะมีการใช้เหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นไฮดรอกไซด์เฟอริกออกไซด์ประเภทหนึ่งเป็นตัวกลางดูดซับ ดังนั้นจึงควรทำความรู้จักกับสมบัติของไฮดรอกไซด์เฟอริกออกไซด์

2.5.4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

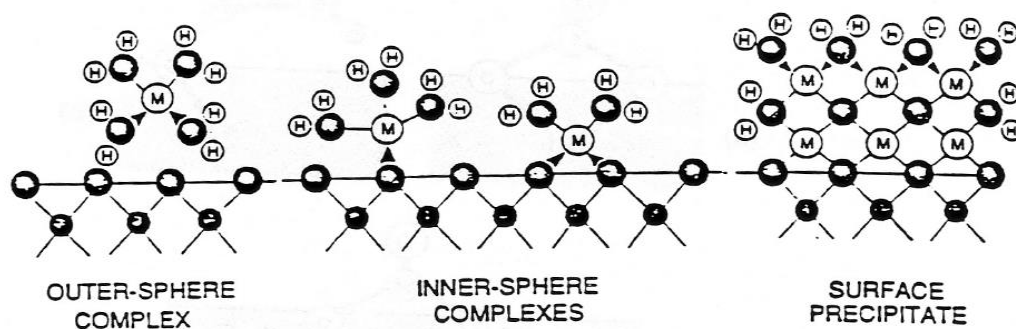
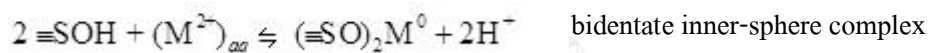
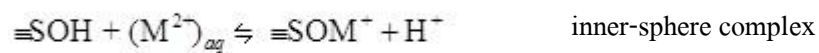
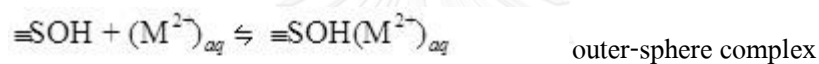
ไฮดรอกไซด์เฟอริกออกไซด์ หรือ Amorphous Ferric Hydroxide และ Amorphous Iron Oxyhydroxide ภายใต้การไฮโดรไลซิสสารละลาย Fe (II) ที่อุณหภูมิ 20-30 °C จะเกิดการตกตะกอนเป็นของแข็ง โดยมีรูปร่างค่อนข้างกลมขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 1-10 นาโนเมตร ซึ่งจากนั้นจะค่อยๆ รวมตัวกันจนตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งภายในจะมีรูพรุนสูงมากและทำให้น้ำรวมอยู่ในโครงสร้างมาก

ของแข็งไฮดรอกไซด์เฟอริกออกไซด์มีรูปร่างไม่แน่นอน โดยทั่วไปจะเขียนสูตรทางเคมีเป็น Fe₂O₃·nH₂O (Dzombak and Morel, 1990) กล่าวว่าส่วนประกอบของแข็งไฮดรอกไซด์เฟอริกออกไซด์จะแปรค่าอยู่ระหว่าง Fe₂O₃·3H₂O ถึง Fe₂O₃·1H₂O จากการวัดค่าความหนาแน่น จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.2-4.0 g/cm³ และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3.5 g/cm³ (Dzombak and Morel, 1990)

ในกระบวนการ aging สารละลาย Fe (II) ที่อุณหภูมิ 20-30 °C ไฮดรอกไซด์ออกไซด์จะเปลี่ยนรูปเป็นผลึกของเหล็กออกไซด์ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ Goethite (Alpha-FeOOH) อัตราการเกิดผลึกเหล็กออกไซด์จะเกิดขึ้นเร็วในสารละลายที่มี Fe (III) สูงและ pH สูง (Dzombak and Morel, 1990)

2.5.5 Surface Complexation Model

Surface Complexation คือสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การดูดซับของโลหะออกไซด์กับอนุภาคมลสารในน้ำโดยอาศัยหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะอยู่โดยรอบพื้นผิวของโลหะดังกล่าวสร้างพันธะทางไฟฟ้ากับมลสารซึ่งได้อธิบายไปในหัวข้อ 2.5.2 ซึ่งลักษณะการจับตัวระหว่างมลสารกับโลหะออกไซด์สามารถแสดงเป็นสมการปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งปฏิกิริยาดูดซับของออกไซด์นั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะจุดซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ด้วยกฎทรงมวล ในขณะที่เดียวกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุขึ้นบนพื้นผิวของตัวกลางด้วย



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาการสร้างพันธะระหว่างพื้นผิวของโลหะออกไซด์กับมลสาร โดย S ในสมการคือโมเลกุลเดี่ยวบนพื้นผิวดังกล่าวคือ \equiv คือสัญลักษณ์พื้นผิว และ M คืออนุภาคมลสาร (P. Glynn, USGS, 2003)

2.6 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หรือ Activated Carbon เป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากบนพื้นผิวของมัน ทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ หรือทำปฏิกิริยาเคมีมีปริมาณมากกว่าปกติ โดยปกติแล้ว กระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งาน หากแต่กระบวนการปรับแต่งโดยสารเคมี หรือกระบวนการพิเศษอื่นๆ ก็ยังมีอยู่เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเฉพาะเหมาะสมกับงานที่ต้องการ

2.6.1 การผลิตถ่านกัมมันต์

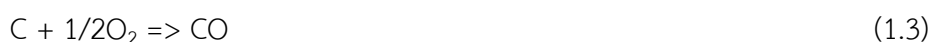
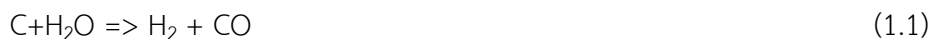
แม้ว่าสารที่ประกอบด้วยคาร์บอนหลายประเภทจะสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ แต่ทว่าสมบัติของสารตั้งต้นนั้นก็จะมีผลกระทบต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่จะได้รับ เช่น ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวจะมีความหนาแน่นสูงและสามารถต้านทานแรงทางกลได้อย่างดีเป็นต้น

กระบวนการทำถ่านกัมมันต์ได้มีการพัฒนาขึ้นไปเรื่อยๆ ตลอดศตวรรษที่ผ่านมา หากแต่กระบวนการส่วนใหญ่จะประกอบด้วยการไพโรไลซิส (ใช้ความร้อนสูงเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี) ของสารตั้งต้น ตามด้วยการออกซิเดชันแบบควบคุมเพื่อเปลี่ยนให้เป็นถ่านกัมมันต์

2.6.1.1 ไพโรไลซิส คือกระบวนการให้ความร้อนกับสารตั้งต้นที่อุณหภูมิประมาณ 600-900 °C ในสภาวะไร้อากาศ การเพิ่มสารประกอบคลอไรด์ของโลหะเข้าไปในระหว่างกระบวนการนี้จะเพิ่มอัตราการสร้างรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งหากว่าสมบัติที่เราต้องการจากถ่านกัมมันต์มีเพียงปริมาณรูพรุนที่มาก ชั้นตอนนี้ก็ถือว่าเป็นอันเสร็จสิ้น แต่คาร์บอนส่วนใหญ่กลับต้องการขั้นตอนที่สองหรือออกซิเดชันด้วย

2.6.1.2 ออกซิเดชัน สมบัติพื้นฐานของถ่านกัมมันต์จะเกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส จะต้องมีการออกซิเดชันตามมาเพื่อเสริมสมบัติของมันให้ดีขึ้น กระบวนการออกซิเดชันมักจะใช้อิอน้ำ (บางครั้งใช้อากาศธรรมดา หรือแม้แต่ CO₂ ก็มีให้เห็น หากแต่เป็นที่นิยมน้อยกว่า) อุณหภูมิของกระบวนการจะยังคงอยู่ที่ 600-900 °C ซึ่งในกระบวนการนี้ ก๊าซที่ใช้ ออกซิเดชันจะกัดกร่อนโครงสร้างภายในรูพรุนให้เกิดเป็นโครงข่ายของรูพรุนที่มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเปลี่ยนสมบัติทางเคมีของอะตอมคาร์บอนบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งอาจจะทำให้เกิดสมบัติการเลือกดูดซับได้ขึ้นกับวิธีการออกซิเดชันและระยะเวลาที่ใช้

ตัวอย่างสมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตถ่านกัมมันต์



2.6.2 สมบัติการดูดซับของพื้นผิวถ่านกัมมันต์

สมบัติของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ หากตัดความไม่บริสุทธิ์ของสารประกอบโลหะที่อาจจะจับติดอยู่บนพื้นผิวจากขั้นตอนการทำออกซิเดชันออกไป จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของคาร์บอนจะขึ้นกับวิธีการออกซิเดชัน (แม้ว่าในทางปฏิบัติจริงจะสามารถเกิดพื้นผิวได้ทั้งสองแบบในอนุภาคเดียวกันก็ตาม) ซึ่งสามารถแบ่งชนิดพื้นผิวของคาร์บอนออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ planar surfaces ของ Carbon microcrystallite และปลายสุดของพื้นผิวคาร์บอน planar surface จะมีความเป็นระเบียบ และมีหมู่ฟังก์ชันน้อยเนื่องจากอิเล็กตรอนของคาร์บอนอะตอมต่างสร้างพันธะซึ่งกันและกัน แต่ผิวข้างของ microcrystallite นั้นไม่ได้เป็นระเบียบและมีหมู่ฟังก์ชันจับอยู่เป็นจำนวนมาก ประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ของถ่านกัมมันต์นั้นจะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันของออกไซด์ที่จับตัวอยู่บนพื้นผิวเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น ฟีนอลจะสร้างพันธะให้-รับ อิเล็กตรอนกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

2.6.3 การใช้ประโยชน์

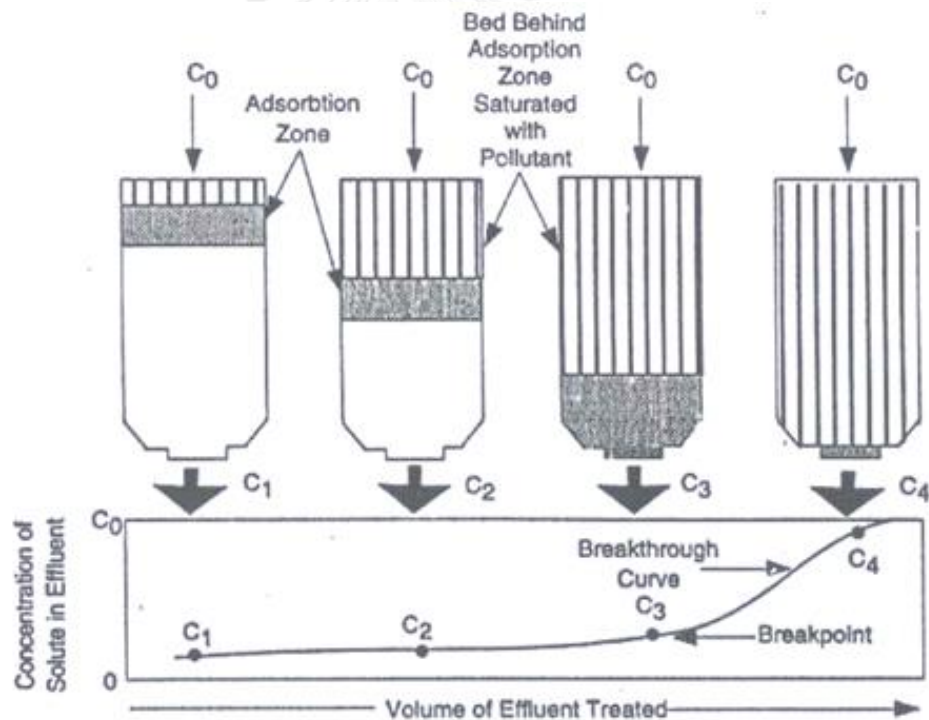
ด้วยสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สามารถสร้างพันธะกับสารประกอบได้หลายประเภทโดยเฉพาะสารอินทรีย์ รวมถึงความหลากหลายในการทำ “conditioning” หรือการปรับแต่งพื้นผิว ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลางที่นิยมในการรวบรวม หรือกำจัดสารประกอบที่ละลายปะปนอยู่ในสารชนิดต่างๆ ทั้งของเหลวและก๊าซ

-ตัวอย่างที่สำคัญของการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์คือเครื่องกรองน้ำ และระบบบำบัดน้ำเสีย หรือน้ำทิ้ง ซึ่งในกรณีระบบบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้ง มักจะใช้ถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนกำจัดสารที่หลงเหลือจากระบบบำบัดน้ำเสียหลักเช่น บ่อเติมอากาศ อีกชั้นหนึ่ง การกำจัดก๊าซไม่พึงปรารถนา ออกจากระบบระบายอากาศก็เป็นอีกหนทางหนึ่งในการเลือกใช้งานถ่านกัมมันต์เช่นกัน

-การใช้งานทางการแพทย์คือใช้เป็นยาถอนพิษสำหรับล้างท้องผู้ป่วย

2.6.4 ลักษณะการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในถังที่ใช้ดูดซับหรือคอลัมน์

เมื่อทำการผ่านของไหลที่ปนเปื้อนมลสารเข้าไปในถังดูดซับหรือคอลัมน์บรรจุตัวกลางดูดซับ ตัวกลางส่วนที่อยู่ติดกับทางน้ำเข้าจะเป็นตัวกลางส่วนแรกที่จะทำการดูดซับมลสารจนถึงจุดอิ่มตัว ขณะที่ตัวกลางส่วนที่อยู่ติดกันนั้นยังมีความสามารถในการดูดซับอยู่ก็จะดูดซับมลสารที่ผ่านจากตัวกลางส่วนแรกต่อไป ขณะที่ตัวกลางส่วนที่อยู่ถัดจากตัวกลางส่วนที่สองไปก็จะยังคงมีประสิทธิภาพดูดซับเต็มอยู่จนกว่าตัวกลางส่วนที่สองจะเริ่มถึงจุดอิ่มตัวและมลสารเริ่มรั่วไหลมายังตัวกลางส่วนที่สาม ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ ตลอดเวลาที่มีการผ่านของไหลปนเปื้อนมลสารเข้ามา จนกระทั่งตัวกลางที่ดูดซับมลสารจนอิ่มตัวเพิ่มปริมาณไปถึงปลายคอลัมน์หรือถังดูดซับ ทำให้ไม่มีตัวกลางในถังหรือคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารหลงเหลืออยู่อีก ซึ่งนี่ก็คือจุด Breakthrough หรือจุดที่มลสารที่ไม่อาจดูดซับได้หมดจะเริ่มรั่วไหลออกมาจากระบบนั่นเองดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดูดซับของระบบบำบัดมลสารแบบคอลัมน์เมื่อเวลาผ่านไป (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: 2015)

2.7 ทบทวนเอกสาร

1. ธรรม รุ่งประกอบกิจ (2541) ศึกษาการกำจัดสารหนู (Arsenic +5) ในน้ำสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และตัวกลางทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ โดยทำเป็นระบบการไหลต่อเนื่องผ่านตัวกลางเหมือนถังกรองทรายเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางทั้งสองในสภาวะต่างๆ ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราการกรองที่เหมาะสมสำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดอาร์เซนิก (+5) อยู่ในช่วง 12-20 BV/hr ขณะที่ทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์อยู่ที่ 2-3 BV/hr ในช่วง pH 7.5-7.8 ส่วนค่า pH ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดคือ 7 สำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และ 3 สำหรับแมงกานีสออกไซด์ โดยรวมแล้วทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะกำจัดอาร์เซนิก (+5) ได้มีประสิทธิภาพและราคาคู่มือต่ำกว่าทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์
2. สมบูรณ์ ประถมศรีเมฆ (2543) ศึกษาการกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก หรือก็คือการนำเศษเหล็กที่ได้จากการกลึงโลหะมาตัดแบ่งเป็นชั้นย่อยๆ แล้วใช้เป็นตัวกลางให้น้ำไหลผ่านในถังปฏิกรณ์ รวมถึงการศึกษาสมบัติที่เกี่ยวกับการดูดซับนิเกิลของเศษเหล็กในการทดลองแบบถังที่ละเท ผลการทดลองพบว่าชั้นตัวกลางที่สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการไหลที่มากขึ้นจะลดประสิทธิภาพ โดยสำหรับชั้นตัวกลางนั้น หากแบ่งเป็นหลายชั้นตัวกลางต่อเนื่องกันจะสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาน้ำท่วมระบบได้ในระดับหนึ่ง รวมถึงพบว่าออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจะเสริมประสิทธิภาพการดูดซับ และค่า pH จะมีผลกับประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพต่ำสุดหาก pH น้อยกว่า 4 และสูงขึ้นเมื่อ pH มากกว่า 8 และไอออนประจุลบในน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลต่ำลงขณะที่ไอออนประจุบวกไม่มีผลใดๆ
3. M. Edward และ M. Benjamin (1989) ศึกษาการใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการดูดซับโลหะชนิดต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆ กันในการไหลผ่านแบบคอลัมน์ เปรียบเทียบกับการใช้ตัวกลางที่เป็นเหล็กไฮไดรต์ (Ferrihydrites) และทรายธรรมชาติทั่วไป รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการแยกโลหะที่ดูดซับมาได้ออกจากตัวกลางโดยใช้กรดเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ข้อสรุปการทดลอง ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีสมบัติต่างๆ เทียบเคียงกับเหล็กไฮไดรต์โดยทั่วไป ขณะที่การทดลองกำจัดโลหะในน้ำเสียทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าทรายธรรมชาติทั่วไป และโลหะสามารถถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการรีเจนเนอเรททรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยกรด นอกจากนี้ ตัวกลางยังสามารถใช้บำบัดสารประกอบแอมโมเนียของแคะเมียม สังกะสี และทองแดงได้ขณะที่ตัวกลางทรายธรรมชาติไม่อาจทำได้

4. อัตราการไหลส่งผลต่อการบำบัดโดยทำให้อัตราการบำบัดสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลช้าลง และ pH มีอิทธิพลต่อการไหลทะลุของมลสาร โดยมีอัตราการไหลทะลุน้อยที่สุดที่ pH 8.5 และอัตราการไหลทะลุมากที่สุดที่ pH 10 ขณะที่หากเป็นตัวกลางทรายธรรมดาจะไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว
5. T.C. Wang และคณะ (1994) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อการกำจัด Cu (II) และ Cr (VI) ออกจากน้ำ โดยเริ่มจากการตรวจสอบสมบัติของพื้นผิวตัวกลางด้วยกระบวนการ X-ray Diffraction, SEM และ N₂ BET จากนั้นทำการทดลองแบบทีละเท (Batch) เพื่อดูอัตราการดูดซับ ผลกระทบของ pH และความสามารถในการดูดซับ การทดสอบแบบคอลัมน์ขึ้นกรองกระทำกับเฉพาะน้ำที่มีทองแดงเท่านั้นเพื่อเปรียบเทียบกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์เคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์สามารถกำจัด Cu (II) ได้เป็นอย่างดี แต่กลับมีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) ที่ต่ำกว่าเหล็กออกไซด์ หรือถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดธรรมดาอย่างเห็นได้ชัด
6. R. K. Harris และคณะ (1999) ศึกษาการใช้กระบวนการ Phosphorus-31 NMR ในการตรวจสอบการดูดซับสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยถ่านกัมมันต์ การทดลองกระทำโดยการนำตัวอย่างถ่านกัมมันต์ใช้แล้วมาเข้าเครื่องทดสอบซึ่งใช้ Chemagnetics ทำให้เกิด ³¹P-Spectra ขึ้นจากสารประกอบฟอสฟอรัสรูปแบบต่างๆ ที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้และตรวจวัดปริมาณการดูดซับจาก ³¹P ที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารประกอบฟอสฟอรัสได้ โดยสารประกอบที่มีความเข้มข้นน้อยจะดูดซับได้ค่อนข้างยาก ซึ่งอาจจะเป็นเพราะระยะห่างระหว่างสารถูกดูดซับในรูพรุนของคาร์บอน กับวงแหวนพันธะอะโรมาติกในคาร์บอน คลื่นที่ตรวจวัดได้ยังสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะภายในของรูพรุนของตัวดูดซับรวมไปถึงสารที่ถูกดูดซับได้อีกด้วย
7. M. Arias และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสโดยใช้เหล็กออกไซด์เคลือบผิวควาตซ์ และอลูมิเนียมออกไซด์เคลือบผิวควาตซ์ และใช้มันในการทดลองแบบทีละเท (Batch Reactor) กับน้ำผสมสารละลายที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส (KH₂PO₄) แล้วคำนวณโดยสมการ Langmuir และ Freundlich ข้อสรุป เหล็กออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนผิวควาตซ์สามารถดักจับและดูดซับฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำได้ โดยสมการ Langmuir นั้นสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ดูดซับดังกล่าวได้ดีกว่าสมการ Freundlich และอลูมิเนียมออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีกว่าเหล็กออกไซด์
8. J. Peng และคณะ (2007) ศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของหน้าดินในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อฝิ่ง (Stabilization pond) โดยการเก็บตัวอย่างหน้าดินจาก

กึ่งกลางบ่อฝังมาใช้ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า pH และความสามารถในการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน เพื่อดูผลกระทบต่อ การดูดซับหรือการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกจากดินตัวอย่างดังกล่าวเมื่อน้ำเสียมี pH และค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า pH ส่งผลต่อการปลดปล่อยและดูดซับฟอสเฟตของดิน โดยสามารถดูดซับได้มากที่สุดที่ pH 7-8 และดูดซับได้น้อยที่สุดที่ pH 5 หรือต่ำกว่า เมื่อพิจารณาฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่นอันได้แก่ Al-P และ Fe-P จะเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วง pH 7-8 ส่วน Ca-P จะเกิดมากขึ้นในช่วง pH 5-9 ในขณะที่ OPalk และ $\text{NH}_4\text{-Cl-P}$ จะมีความเข้มข้นลดลง และเมื่อความนำไฟฟ้าของน้ำสูงขึ้น อัตราการเกิด Fe(III) ซึ่งสามารถจับตัวเป็นสารประกอบ Fe(III)-P ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

9. Xinchao Wei และคณะ (2008) ศึกษาการนำตะกอนกรดของเสีย (Acid mine Drainage Sludge) จากระบบบำบัดน้ำเสียเหมืองถ่านหิน มาใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายออร์โทฟอสเฟต (orthophosphate) ในน้ำเสียชุมชน โดยทำการทดลองผสมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ในปริมาณ สภาวะ pH อุณหภูมิ ความเข้มข้นต่างๆ กัน และการทดลองกับถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) โดยการป้อนน้ำเสียประเภทต่างๆ และ Sludge ด้วยอัตราการไหลที่ต่างกันเพื่อควบคุมระยะเวลาคงอยู่ในถังปฏิกรณ์ แล้วทำการตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เหลือหลังการบำบัด โลหะที่อาจละลายออกมาจาก Sludge เพราะการเปลี่ยนแปลงของ pH หรือปฏิกรณ์ ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ Sludge ที่ผสมลงไป ในน้ำเสีย การเพิ่มระยะเวลาผสม และการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย ขณะที่ค่า pH ที่สูงขึ้นจะลดประสิทธิภาพลง ส่วนโลหะที่ละลายออกมาจาก Sludge ที่ตรวจพบมีแมงกานีสและอลูมิเนียมที่ pH ต่ำกว่า 6 และมากกว่า 8 ตามลำดับ ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าจะไม่มีผลกับการบำบัดจริงด้วยน้ำเสียชุมชนมีค่า pH อยู่ในช่วง 6-8 อยู่แล้ว
10. Gh. Ghanizadeh และคณะ (2010) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ผ่านกรรมวิธีเคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูออกจากน้ำ ทำการทดลองแบบที่ละเทโดยใช้ น้ำที่มีสารหนูละลายอยู่ที่ความเข้มข้นที่รู้ค่าแน่นอนและปริมาตรคงที่ผสมกับถ่านกัมมันต์เคลือบผิวดังกล่าวในปริมาณที่ต่างกันออกไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ววัดสารหนูที่หลงเหลืออยู่เพื่อหาค่า Isotherm ของตัวกลางดูดซับ ซึ่งผลที่ได้พบว่าถ่านกัมมันต์ซึ่งถูกเคลือบผิวนั้นจะมีพื้นที่ผิวในรูปพรุนลดลงเนื่องจากอนุภาคของเหล็กออกไซด์เข้าไปจับกับพื้นผิวดังกล่าวในกระบวนการเคลือบผิวทำให้ขนาดของรูพรุนลดลงไป และระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่สามารถ

กำจัดสารหนูออกไปได้ 75% คือที่ 150 นาที แต่กระนั้นผลการทดลองนี้ก็ยังมีความเร็วในการดูดซับที่ไม่ดีพอซึ่งอาจจะต้องปรับปรุงโดยเพิ่มความเข้มข้นของเหล็กออกไซด์บนพื้นผิว

เนื่องจากทบทวนเอกสารเหล่านี้ไม่มีการใช้เหล็กออกไซด์ในการบำบัดฟอสฟอรัส หากแต่เป็นการบำบัดโลหะและมลสารชนิดอื่น การนำไปใช้ประโยชน์ในการทดลองจึงจำกัดเพียงแค่การป้องกันปัญหาที่พบในงานวิจัยเหล่านี้มิให้เกิดขึ้น รวมไปถึงลักษณะสมบัติบางประการของเหล็กออกไซด์ที่สามารถใช้อ้างอิงได้ เช่น M. Edward และ M. Benjamin (1989) ที่นำวิธีการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มาใช้ทำให้ทราบว่าเหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปของ Fe^{3+} Ferrichydride ($(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) หรือปัญหาน้ำท่วมในระบบคอลัมน์ของธรรมชาติ รุ่งประกอบกิจ (2541) ซึ่งจะเกิดขึ้นกับคอลัมน์ที่มีความสูงมากกว่า 1 เมตร ซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบการทดลองแบบคอลัมน์ในงานวิจัยนี้



บทที่ 3

แผนงานและการดำเนินการวิจัย

การทดลองดำเนินการในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสจะใช้ขั้นตอนการวิเคราะห์หาฟอสเฟตทั้งหมดโดยวิธีแอสคอบิกเอซิด เทียบกับกราฟมาตรฐานความเข้มข้นที่จัดทำขึ้นเตรียมไว้ก่อนหน้า ส่วนน้ำที่ใช้ในการวิจัยจะเป็นน้ำที่ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของอาคารในจุฬาฯ แบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่อาคารมหิตลาธิเบศร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมคอลัมน์บรรจุตัวกลาง เตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์, ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด, ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบเหล็กออกไซด์ อุปกรณ์ สารเคมีต่างๆ ที่ต้องใช้

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองหาไอโซเทิร์มการดูดซับฟอสฟอรัสในสารละลายมาตรฐานของตัวกลางโดยการทดลองแบบทีละเท

ขั้นตอนที่ 3 การทดลองการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของตัวกลางโดยการทดลองแบบทีละเท เปรียบเทียบพฤติกรรมกับสารละลายมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาผลของเวลากักเก็บของระบบโดยการปรับค่าระยะเวลาเก็บ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลงเหลือและฟอสฟอรัส เปรียบเทียบระหว่างตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของลักษณะของพื้นผิวของตัวกลางดูดซับทั้งก่อนและหลังทำการเดินระบบ

3.2 การจัดเตรียมการทดลอง

3.2.1 ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กจะเตรียมด้วยวิธีการของ Edward และ Benjamin, 1989

1. ทรายที่ใช้เป็นทรายละเอียดที่ใช้ในงานก่อสร้างนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำทรายที่อบแล้ว 200 กรัมผสมกับสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 20 กรัมละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เหล็กที่เคลือบบนพื้นผิวตัวกลางนี้จะเป็น Ferrihydrite (Fe^{3+})

3. นำทรายเคลือบมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างใส
4. นำไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปใช้งาน หรือเก็บรักษาในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้อง

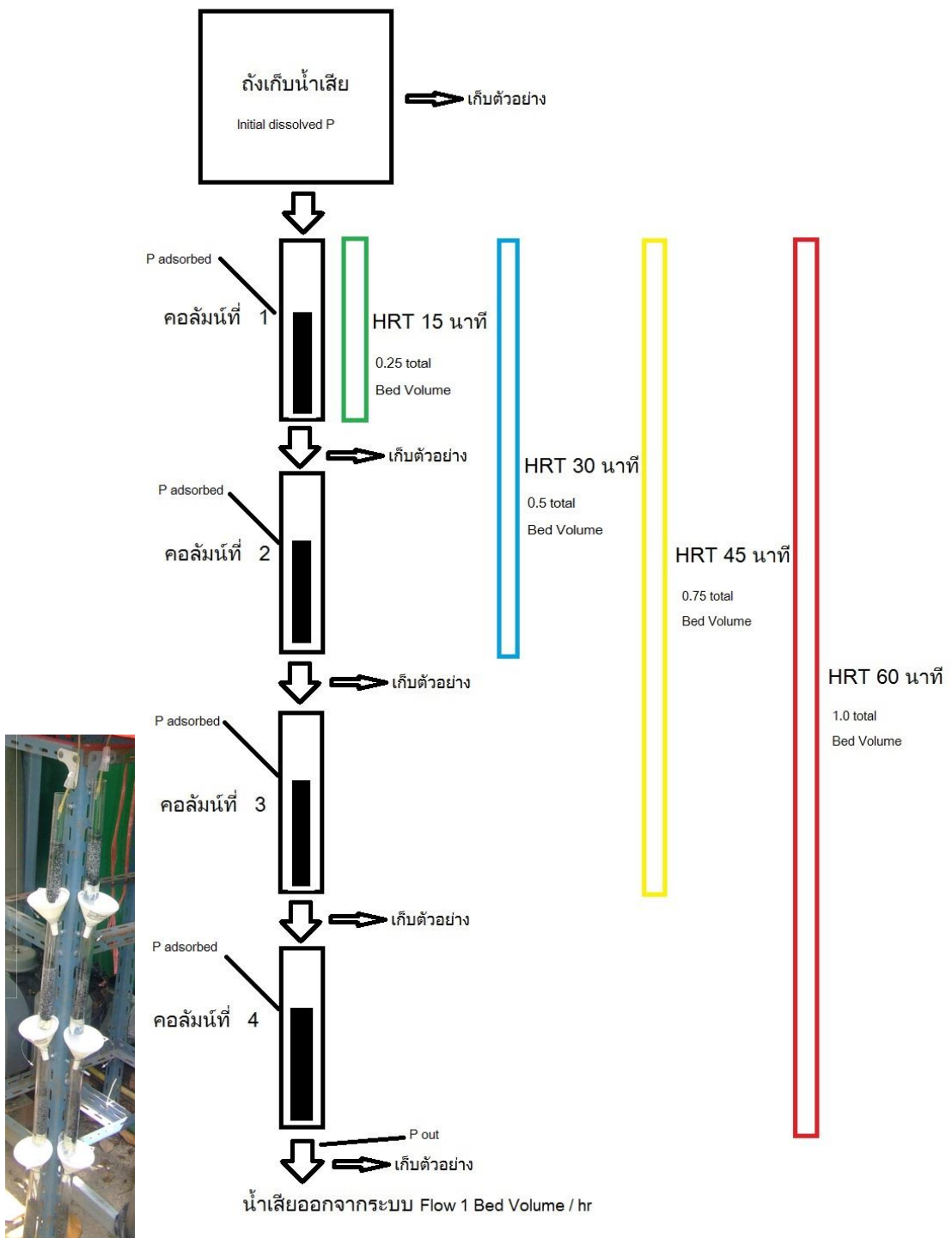
3.2.2 การจัดเตรียมตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ จัดเตรียมด้วยวิธีการที่ระบุในงานวิจัยของ T.C. Wang และคณะฯ (1994)

1. นำถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด 200 กรัม ผสมกับสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้อากาศที่อยู่ภายในรูพรุนหลุดออก
2. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเหล็กที่เคลือบบนพื้นผิวตัวกลางนี้จะเป็น Ferrihydrite (Fe^{3+})
3. นำถ่านมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างใส
4. นำไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปใช้งาน หรือเก็บรักษาในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้อง

3.2.3 เครื่องมือในการทดลองอื่นๆ

1. ปีกเกอร์
2. ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ
3. ปิเปต
4. หลอดไตเตรต
5. สเปคโตรโฟโตมิเตอร์
6. หลอดทดลอง
7. น้ำกลั่น

3.2.3.1 การเตรียมคอลัมน์บรรจุตัวกลางสำหรับการดูดซับ โดยคอลัมน์บรรจุตัวกลางแต่ละชิ้นส่วนทำจากพลาสติกใสเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.36 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร ต่อนุกรม 4 ชั้น ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแผนผังของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3.2 การจัดเตรียมน้ำทิ้งจากระบบบำบัดสำหรับใช้ในการทดลอง และการวัดค่าสมบัติของน้ำทิ้ง

ทำการวัดค่าสมบัติเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำทิ้งที่นำมาทำการทดลอง อันได้แก่ pH, COD และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำทิ้งดังกล่าว โดยการวัดค่าสมบัติเริ่มต้นของน้ำทิ้งที่นำมาทำการทดลองจะวัดในแต่ละวันที่มีการทดลอง น้ำที่ผ่านคอลัมน์ดูดซับแล้วจะถูกวัดด้วยวิธีการเหล่านี้เช่นกัน

COD: วัดโดยวิธีรีฟลักซ์ รายละเอียดวิธีการอ้างอิงถึงภาคผนวก ก.

pH: ทำการวัดโดย pH Meter

Orthophosphate: วัดโดยวิธีการแอสคอบิกเอซิด รายละเอียดวิธีการอ้างอิงถึงภาคผนวก ก.



3.3 การดำเนินการทดลอง

โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็นดังต่อไปนี้

3.3.1 ศึกษาไอโซเทิร์ม (Isotherm) ของตัวกลางที่นำมาทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองหาไอโซเทิร์มของฟอสฟอรัส

1. ผสมน้ำกลั่นกับ KH_2PO_4 เพื่อทำสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยให้ความเข้มข้น 1 mg/L, 3 mg/L, 5 mg/L, 7 mg/L และ 10 mg/L ปริมาตร 100 ml
2. ใส่ตัวกลางที่ต้องการทดสอบลงในทุกสารละลายปริมาณ 5 กรัม ให้ความเข้มข้นของตัวกลางเป็น 50 g/L จากนั้นกวนผสมตลอดเวลา
3. ทำการวัดความเข้มข้นฟอสฟอรัสทั้งหมดในสารละลายหลังจากกวนผสมได้ 5, 10, 20, 40 และ 60 นาทีตามลำดับ
4. นำค่าที่วัดได้จากการทดลองมาคำนวณและสร้างกราฟระหว่าง (“ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับเข้าไปในตัวกลาง” ต่อ “น้ำหนักร่างตัวกลาง”) กับ (ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล) เพื่อหาสมการไอโซเทิร์มที่น่าจะสามารถใช้คาดการณ์ความสัมพันธ์ได้ (Langmuir หรือ Freundlich equation)
5. ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 4) โดยเปลี่ยนตัวกลางเป็นชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลองแทน

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวกลางต่อน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

1. นำน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองมา 100 มิลลิลิตร
2. ใส่ตัวกลางที่ต้องการทดสอบลงในทุกบีกเกอร์ปริมาณ 0.5, 2, 5, 7 และ 10 กรัม จากนั้นกวนผสมตลอดเวลา
3. ทำการวัดความเข้มข้นฟอสฟอรัสทั้งหมด, pH และค่า COD ในสารละลายหลังจากกวนผสมได้ 5, 10, 20, 40 และ 60 นาทีตามลำดับ
4. นำค่าที่วัดได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลไอโซเทิร์มของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต
5. ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 4) โดยเปลี่ยนตัวกลางเป็นชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลองแทน

3.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสที่ความสูงของชั้นตัวกลางทรายเคลือบเหล็กต่างกัน เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบเหล็กออกไซด์

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองความสูง

ตัวแปร	ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบเหล็กออกไซด์	ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
ตัวแปรอิสระ			
1 ความสูงรวมของคอลัมน์	25 ซม. / 15 ซม.	25 ซม. / 15 ซม.	25 ซม. / 15 ซม.
/ ความสูงรวมของชั้นตัวกลางทั้งหมดที่น้ำไหลผ่าน	50 ซม. / 30 ซม. 75 ซม. / 45 ซม. 100 ซม. / 60 ซม.	50 ซม. / 30 ซม. 75 ซม. / 45 ซม. 100 ซม. / 60 ซม.	50 ซม. / 30 ซม. 75 ซม. / 45 ซม. 100 ซม. / 60 ซม.
ตัวแปรคงที่			
1เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์	2.3 ซม.	2.3 ซม.	2.3 ซม.
2 ความสูงของคอลัมน์แต่ละช่วง	25 ซม.	25 ซม.	25 ซม.
3 ขนาดของตัวกลาง	0.6-0.85 มม.	0.6-0.85 มม.	0.6-0.85 มม.
4 ความสูงของชั้นตัวกลางในแต่ละช่วงคอลัมน์	15 ซม.	15 ซม.	15 ซม.
5 จุดยุติ / จุดไหลทะลุ (Breakthrough)	ความเข้มข้นออกของออร์โธฟอสฟอรัสเกินกว่า 0.5 mg/l ต่อชั้นคอลัมน์	ความเข้มข้นออกของออร์โธฟอสฟอรัสเกินกว่า 0.5 mg/l ต่อชั้นคอลัมน์	ความเข้มข้นออกของออร์โธฟอสฟอรัสเกินกว่า 0.5 mg/l ต่อชั้นคอลัมน์
6 ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียรวมตลอดทุกคอลัมน์	1 ชม. หรือ 1.0 BV / hr. (4.15 ml / min.)	1 ชม. หรือ 1.0 BV / hr. (4.15 ml / min.)	1 ชม. หรือ 1.0 BV / hr. (4.15 ml / min.)
ตัวแปรตาม			
1 ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์	ฟอสฟอรัส COD	ฟอสฟอรัส COD	ฟอสฟอรัส COD
2 ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ก่อนถึงจุดยุติ	pH	pH	pH

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. บรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์แต่ละชั้น โดยให้ชั้นตัวกลางสูง 15 ซม. ในแต่ละชั้นคอลัมน์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนประมาณ 2 ใน 3 ของความสูงรวมของคอลัมน์
2. ป้อนน้ำที่เข้าคอลัมน์ทางด้านบนโดยใช้อัตราการไหล 1.0 BV/ hr. (1 BV = ปริมาณน้ำ 249 มิลลิเมตร) หรือระยะเวลาที่เก็บในชั้นตัวกลางรวม 4 ชั้นเท่ากับ 1 ชม.
3. วิเคราะห์หาฟอสฟอรัส, COD และ pH จากแต่ละชั้นคอลัมน์ตัวกลางในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 1 วัน จากนั้นวัดวันละครั้งจนกว่าจะถึงจุดไหลทะลุ (Breakthrough) คือมีฟอสฟอรัสปนมากับน้ำออกเกิน 0.5-1.0 mg/l ในแต่ละชั้นคอลัมน์
4. วัดปริมาณน้ำทั้งหมดที่บำบัดได้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดยุติ โดยคำนวณปรับหน่วยให้เป็น Bed Volume ตามปริมาณตัวกลางที่น้ำเคลื่อนผ่าน (i.e. การวิเคราะห์คอลัมน์ชั้นที่ 2 จะใช้หน่วย Bed Volume ของคอลัมน์ที่ 1 และ 2 รวมกัน)
5. ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 4) โดยเปลี่ยนตัวกลางเป็นชนิดอื่นที่ต้องการวิเคราะห์ในการทดลอง

3.3.3 ศึกษาลักษณะของพื้นผิวตัวกลางในสภาวะก่อนและหลังจากการเดินระบบถึงจุดยุติ

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่างตัวกลางทั้งสามชนิด โดยแบ่งเป็น 1) ตัวกลางก่อนนำมาใช้ในการทดลอง และ 2) ตัวกลางหลังผ่านการทดลองจนถึงจุดยุติแล้ว ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวตัวกลางและวิเคราะห์ธาตุที่อยู่บนพื้นผิวตัวกลาง โดยใช้เครื่องมือที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางด้านไอโซเทิร์มของการดูดซับฟอสฟอรัส

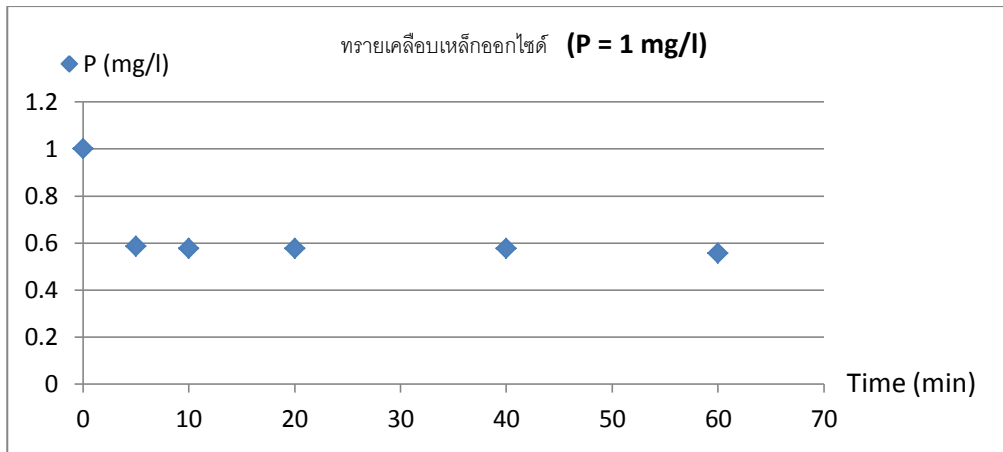
การทดลองนี้เพื่อศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับฟอสฟอรัสโดยตัวกลางทั้งสามชนิดที่นำมาทำการทดลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการดูดซับมากที่สุดของแต่ละตัวกลาง และนำมาเปรียบเทียบกับผลการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการไหลผ่านชั้นตัวกลางแบบคอลัมน์ต่อไป

4.1.1 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางชนิดต่างๆ กับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเทียบกับถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

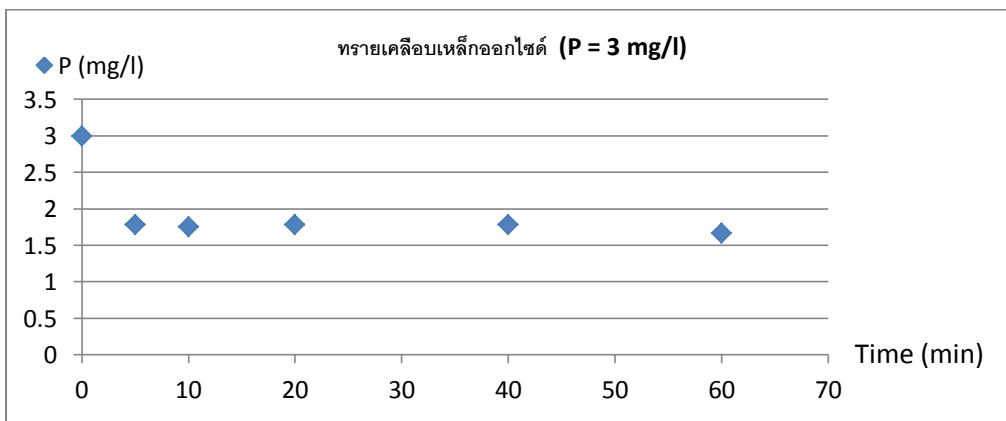
ทำการทดลองโดยการนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสในช่วง 1-10 มิลลิกรัม / ลิตร แล้วกวนผสมกับตัวกลางที่ปริมาณ 50 g/l จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในน้ำในช่วงเวลา 5 นาที, 10 นาที, 20 นาที, 40 นาที และ 60 นาที แล้วนำผลที่วัดได้มาวิเคราะห์และเขียนกราฟของไอโซเทิร์ม

4.1.1 ก) ไอโซเทิร์มและจลนศาสตร์การดูดซับของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

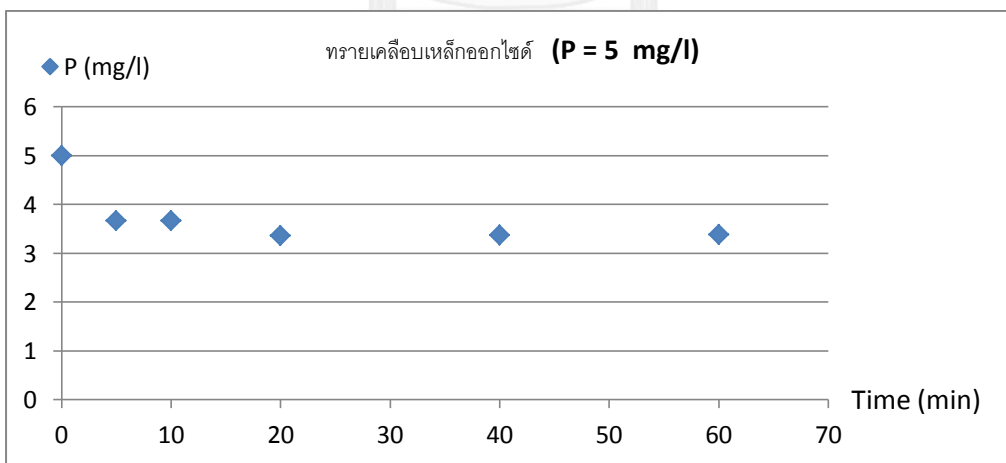
จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายมาตรฐานมีค่าต่ำกว่า 1 mg/l ในกรณีใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ปริมาณ 50 g/l ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เหลือ ณ จุดสมดุลจะมีค่าประมาณ 0.6 mg/l และถึงจุดสมดุลภายในเวลา 5 – 10 นาที ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายมาตรฐานที่ 3 mg/l จะมีจุดสมดุลความเข้มข้นอยู่ที่ 1.7 mg/l ที่เวลา 5-10 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอยู่ที่ 5 mg/l ที่การดูดซับจะถึงจุดสมดุล 3.3 mg/l ในเวลาประมาณ 10 นาที ส่วนสารละลายมาตรฐานเข้มข้น 7 mg/l จะถึงจุดสมดุลที่ 3.8mg/l ในเวลา 10 นาที ขณะที่สารละลายมาตรฐาน 10 mg/l จะถึงจุดสมดุลที่ประมาณ 5-20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1



ก) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 1 mg/l



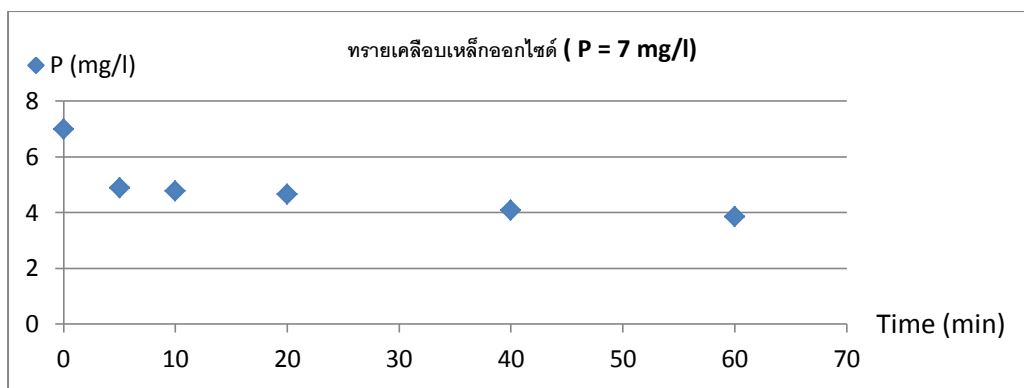
ข) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 3 mg/l



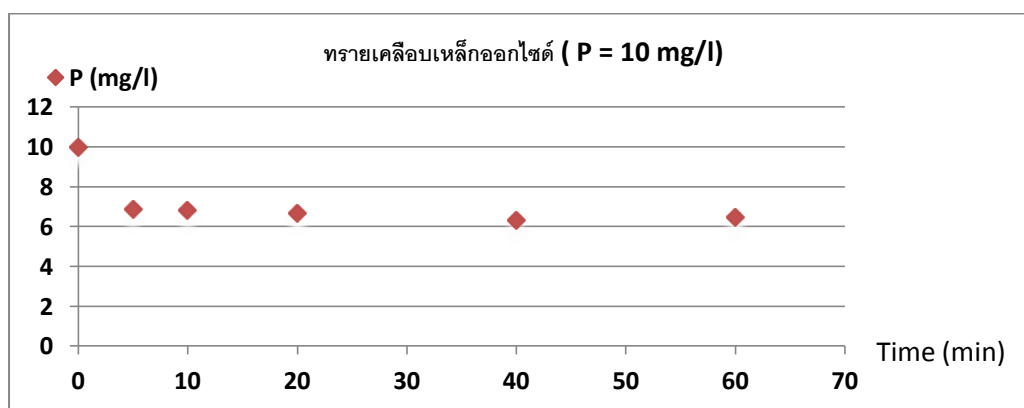
ค) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 5 mg/l

รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตโดยใช้ทราวยเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร

ก) P = 1 mg/l ข) P = 3 mg/l ค) P = 5 mg/l ง) P = 7 mg/l จ) P = 10 mg/l



ง) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 7 mg/l



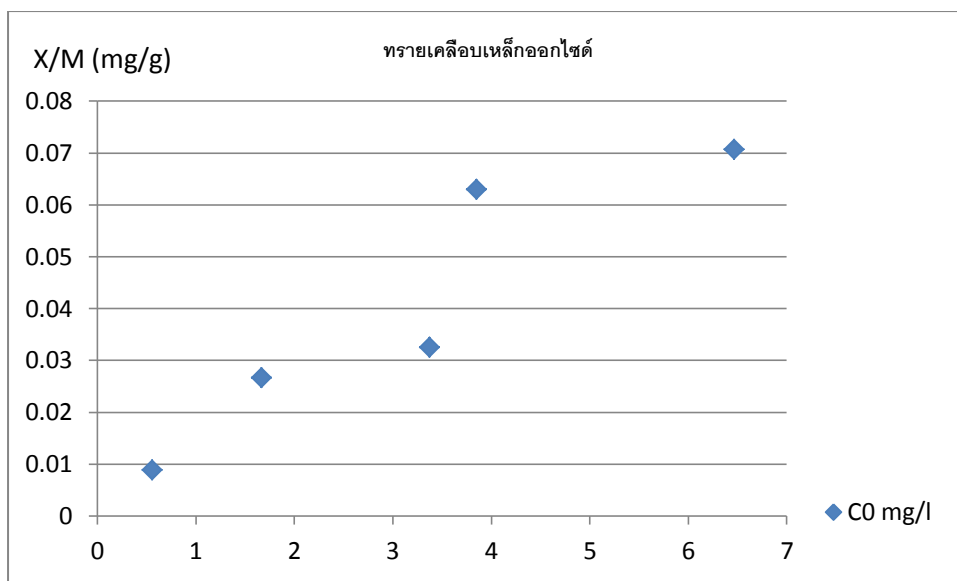
จ) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 7 mg/l

รูปที่ 4.1 (ต่อ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตโดยใช้ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร

ก) P = 1 mg/l ข) P = 3 mg/l ค) P = 5 mg/l ง) P = 7 mg/l จ) P = 10 mg/l

ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ จึงสรุปว่าการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มของการดูดซับโดยทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่เวลา 60 นาที เป็นระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่จุดสมดุลหรือใกล้เคียงมากที่สุด

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวกลาง (X/M, mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C_0 , mg/l) ได้ โดยใช้ค่าที่วัดที่เวลา 60 นาทีเป็นจุดสมดุลของการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (X/M, mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C₀, mg/l)

หากตั้งสมมุติฐานว่าไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบ Freundlich ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$q = KC^{\frac{1}{n}} \quad (4.1)$$

สมการสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\text{Log } q = \text{log } K + \left(\frac{1}{n}\right) \text{log } C \quad (4.2)$$

ซึ่งสามารถลากเส้นแนวโน้มได้ดังรูปที่ 4.3

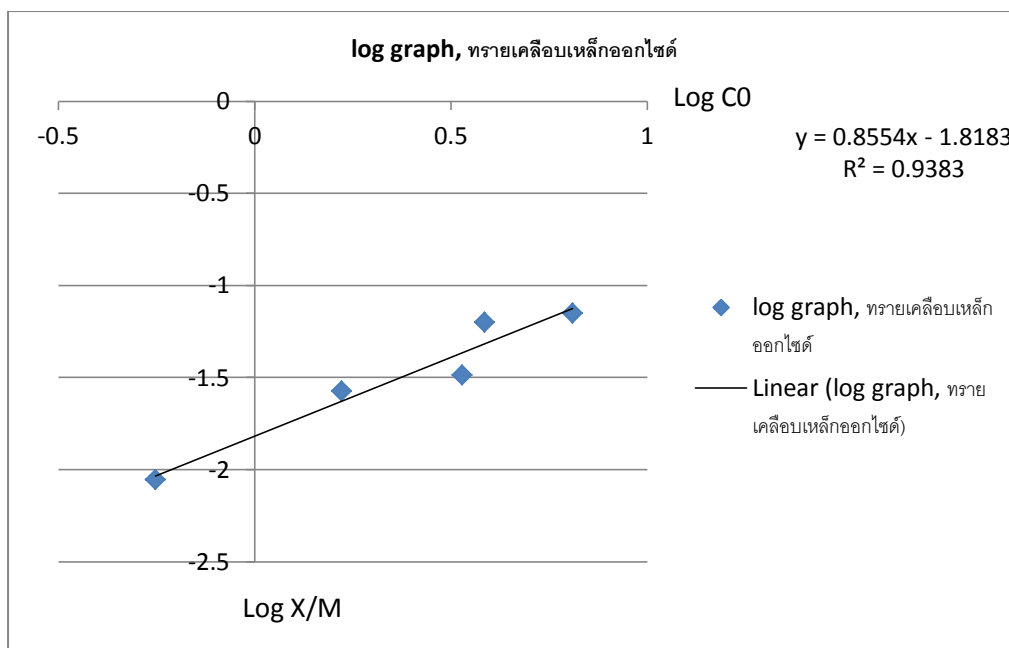
และสมการเส้นแนวโน้มคือ $y = 0.8554x - 1.8183$

ได้ $1/n$ ของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเป็น 0.8554

และ $\text{Log } K$ เป็น -1.8183 หรือ $K = 0.015195$

ดังนั้นสมการของ Freundlich สำหรับการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$q = (0.015195)C^{0.8554} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.3 กราฟ $\text{Log } C_0$ กับ $\text{Log } \frac{X}{M}$ ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้นต่างๆ กัน และเส้นแนวโน้มรวมทั้งสมการเส้นแนวโน้ม

เมื่อตั้งสมมุติฐานเป็นสมการแบบ Langmuir แล้วเขียนกราฟแนวโน้มระหว่าง $\frac{C_0}{X/M}$ กับ C_0 แล้วจะ

ได้ดังรูปที่ 4.4 และเมื่อทำการลากเส้นแนวโน้มเปรียบเทียบกับสมการ Langmuir

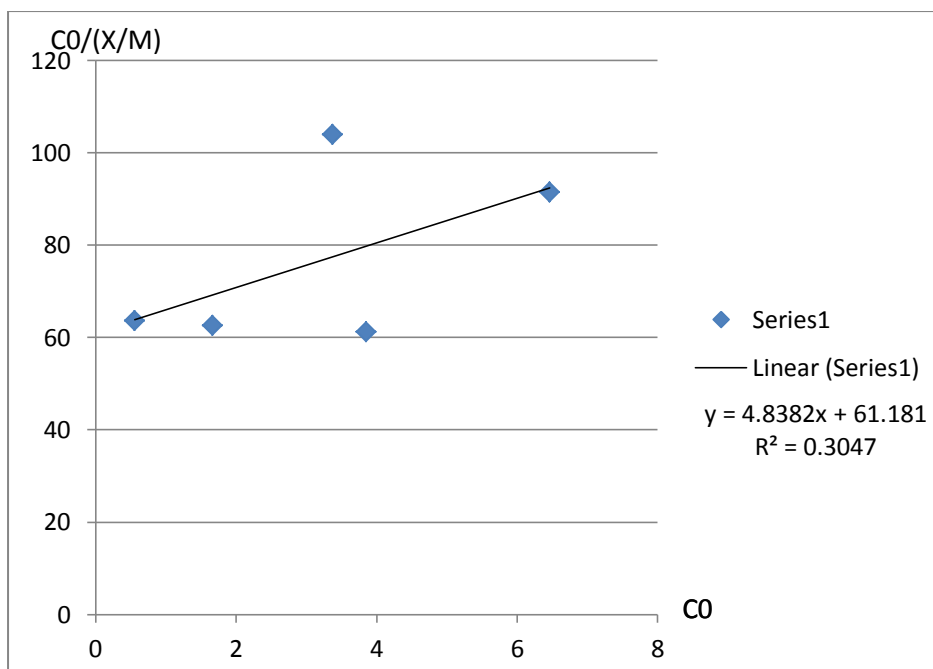
$$\frac{C_0}{X/M} = \frac{a}{q_m} + \frac{C_0}{q_m} \quad (4.4)$$

จะได้ค่า $\frac{a}{q_m}$ จากจุดตัดแกน y ซึ่งก็คือ 61.181

ขณะที่ค่า $\frac{1}{q_m}$ จะได้จากความชันของเส้นแนวโน้มซึ่งจากกราฟจะได้เป็น 4.8382 mg P/g

ดังนั้นค่า a จึงเท่ากับ 12.645 L/mg P และสมการ Langmuir สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{C_0}{X/M} = 61.181 + 4.8382C_0 \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{C_0}{X/M}$ กับ C_0 ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่จุดสมดุล

ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ระยะเวลา 60 นาที และเส้นแนวโน้ม

เมื่อเปรียบเทียบค่า R^2 ของสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟจะพบว่าค่า R^2 ของสมการ Freundlich คือ 0.9383 ขณะที่ค่า R^2 ของสมการ Langmuir อยู่ที่ 0.3047 ซึ่งเท่ากับว่าค่าความคาดเคลื่อนของสมการ Freundlich มีน้อยกว่า ดังนั้นสมการ Freundlich จะใช้อธิบายปรากฏการณ์ดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ได้แม่นยำกว่า

สำหรับจลนศาสตร์การดูดซับหรือ Adsorption Kinetic นั้น เมื่อดูจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาแล้วทำให้สามารถตัด Zero Order Reaction ออกจากการพิจารณาได้ เนื่องจากอัตราการดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายลดลงไป

เมื่อตั้งสมมุติฐานว่าเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ First Order Reaction แล้ว จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log ความเข้มข้นกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.5 ก) ซึ่งจากสมการเส้นแนวโน้ม พบว่าค่า k ควรจะมีค่าประมาณ 0.0073 min^{-1}

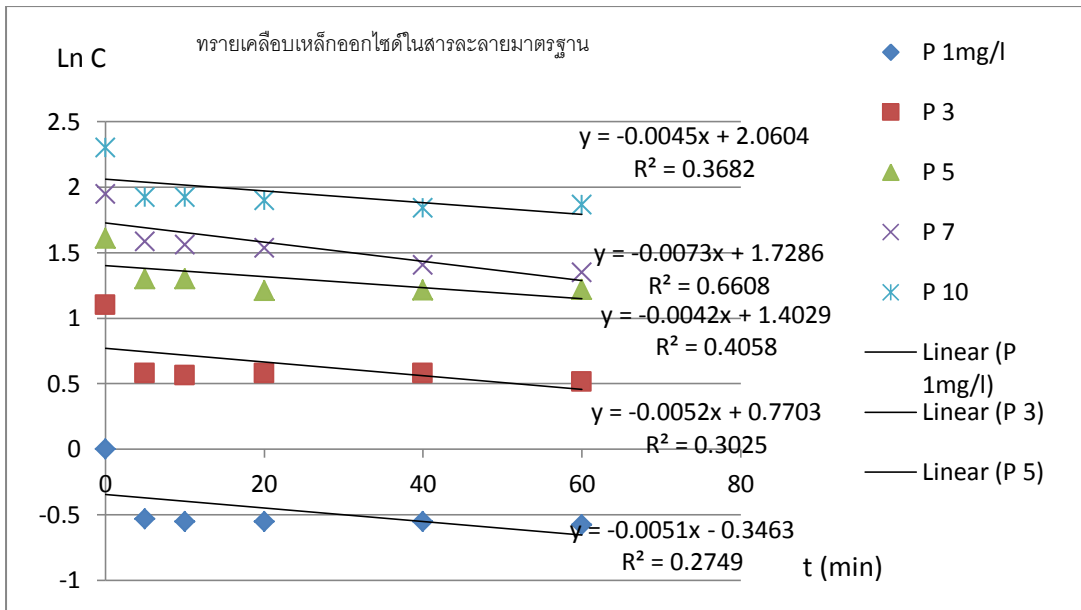
ทว่าเนื่องจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นถึงจุดสมดุลในระยะเวลาเพียง 10-20 นาที ดังนั้นหากเราสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log ความเข้มข้นกับเวลาในช่วง 20 นาทีดังรูปที่ 4.5 ข) จะพบว่าค่า k ควรจะมีค่าประมาณ 0.0169 min^{-1} โดยมีค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.54

เมื่อตั้งสมมุติฐานเป็น Second Order Reaction แล้ว จะสามารถหาได้จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง (1/ความเข้มข้น) กับเวลาได้ดังรูปที่ 4.5 ค) ซึ่งจากสมการเส้นแนวโน้ม พบว่า ค่า k ควรจะมีค่าประมาณ 0.0015 min^{-1}

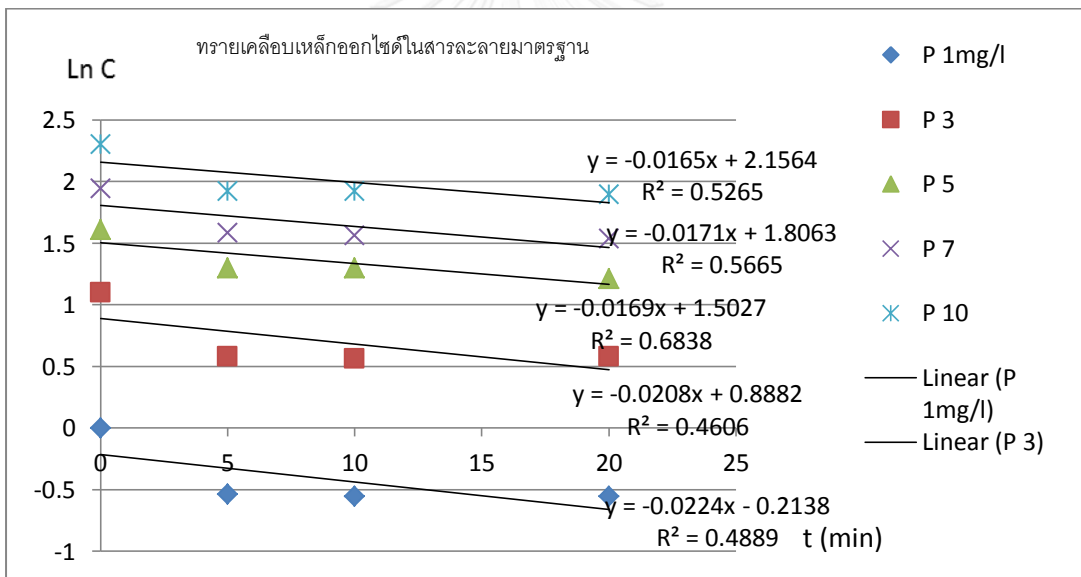
ทว่าเนื่องจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นถึงจุดสมดุลในระยะเวลาเพียง 10-20 นาที ดังนั้นหากเราสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (1/ความเข้มข้น) กับเวลาในช่วง 20 นาทีดังรูปที่ 4.5 ง) จะพบว่าค่า k ควรจะมีค่าประมาณ 0.0042 min^{-1} โดยมีค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.55

เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 เฉลี่ยที่ได้จากกราฟการคำนวณปฏิกิริยาทั้งสองแบบแล้วทำให้พบว่า ปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นจะสามารถอธิบายได้แม่นยำกว่าในรูปของ Second Order แต่กระนั้นปฏิกิริยาแบบ Second Order ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก สังเกตได้จากค่า R^2 เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 0.9 ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าจลนศาสตร์การดูดซับฟอสฟอรัสโดย ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นจะเป็นรูปแบบอื่นนอกเหนือจากรูปแบบมาตรฐานที่นำมาพิจารณา

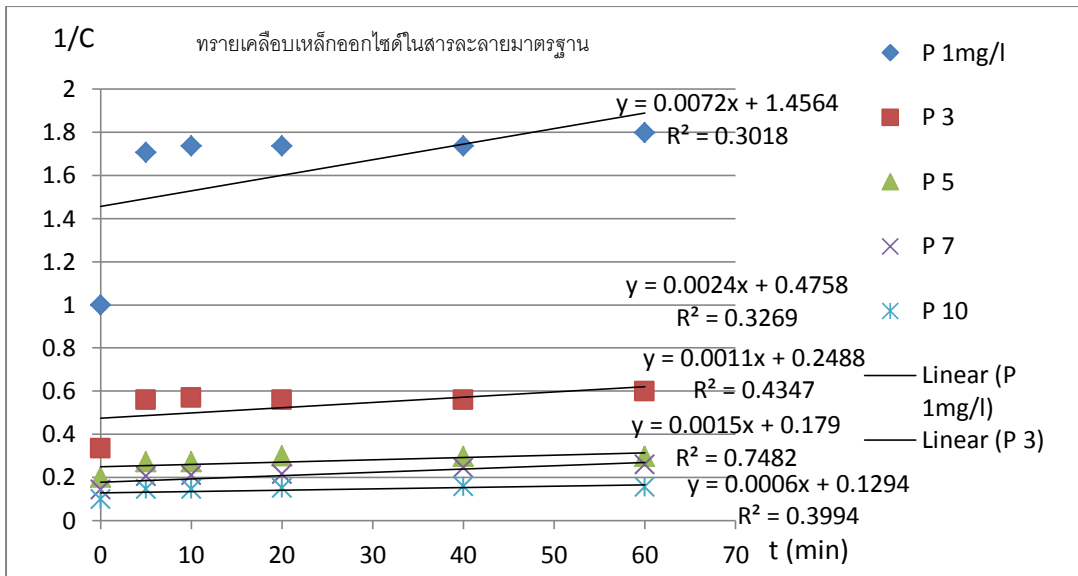




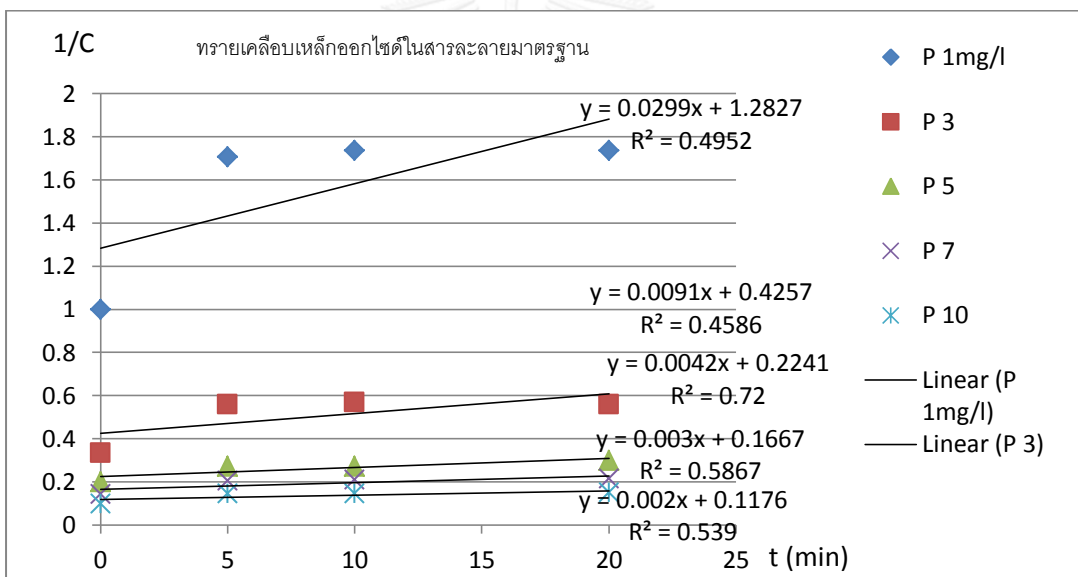
ก) ค่า Ln ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับเวลา วัดที่เวลา 0-60 นาที



ข) ค่า Ln ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับเวลา วัดที่เวลา 0-20 นาที



ค) ค่า $1/\text{ความเข้มข้นฟอสฟอรัส}$ กับเวลา วัดที่เวลา 0-60 นาที

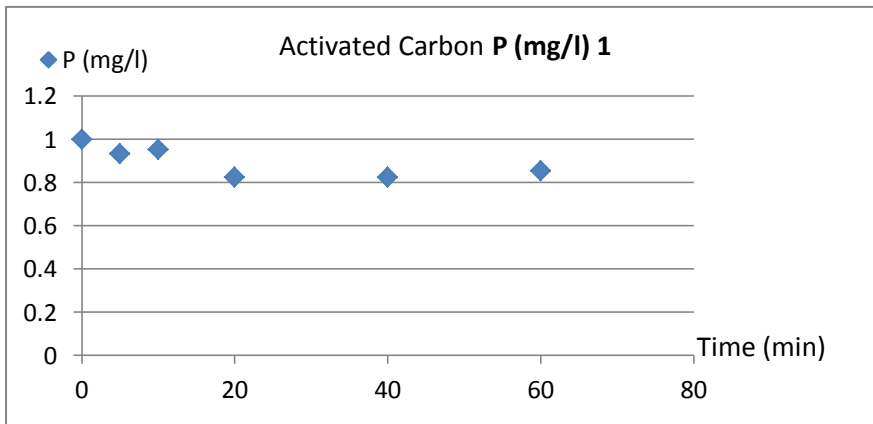


ง) ค่า $1/\text{ความเข้มข้นฟอสฟอรัส}$ กับเวลา วัดที่เวลา 0-20 นาที

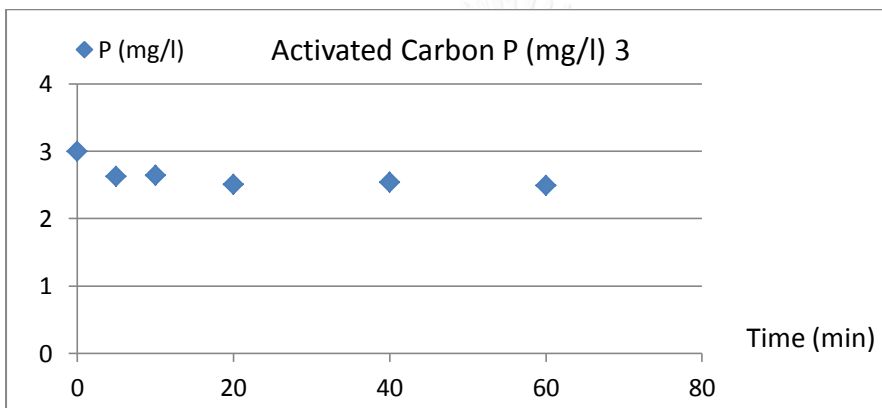
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่กวนผสมกับทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ 50 g/l กับเวลา

4.1.1 ข) ไอโซเทิร์มและจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต การทดลองนี้ใช้ถ่านกัมมันต์ความเข้มข้น 50g/l กับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 7 และ 10 mg/l จะให้ผลลัพธ์ในลักษณะที่ใกล้เคียงกันกล่าวคือถึงจุดสมดุลในการดูดซับในเวลา

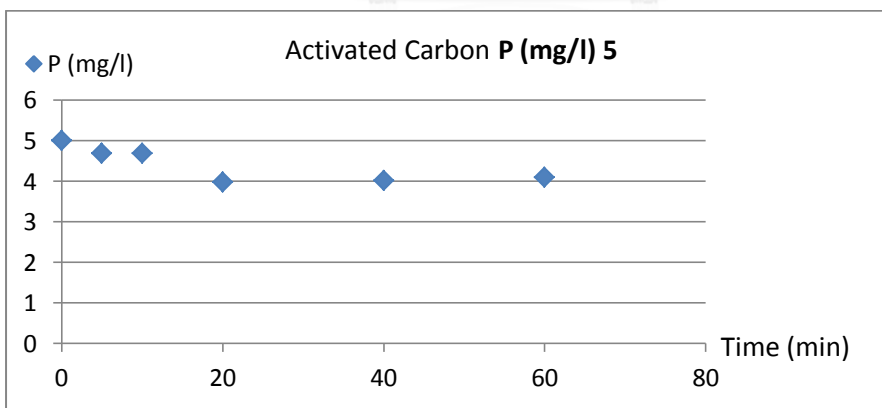
ประมาณ 10-40 นาที หากแต่ประสิทธิภาพการกำจัดนั้นมีเพียง 20% โดยประมาณเท่านั้น



ก) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 1 mg/l



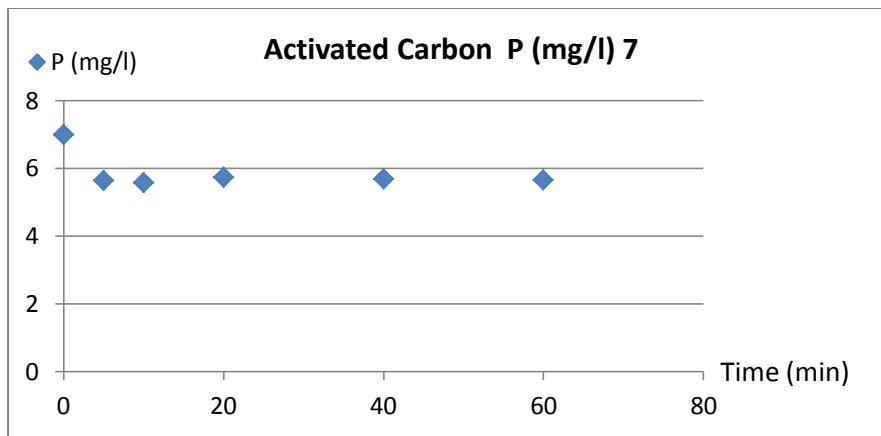
ข) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 3 mg/l



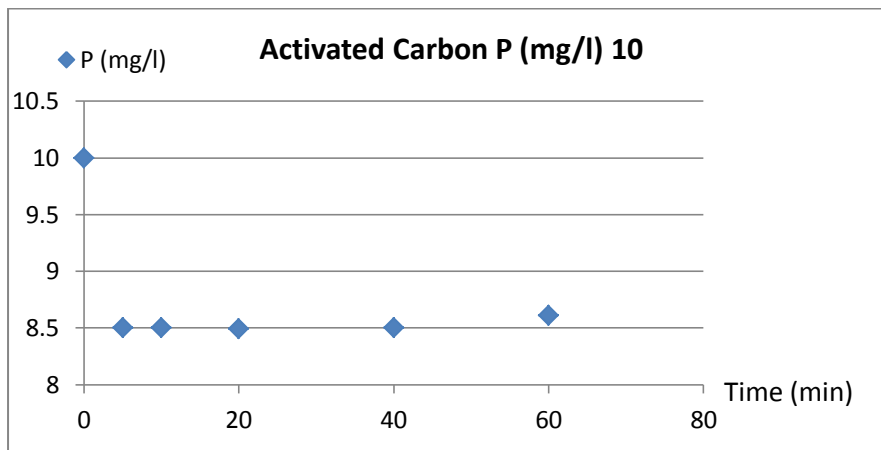
ค) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 5 mg/l

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร

ก) P = 1 mg/l ข) P = 3 mg/l ค) P = 5 mg/l ง) P = 7 mg/l จ) P = 10 mg/l



ง) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 7 mg/l

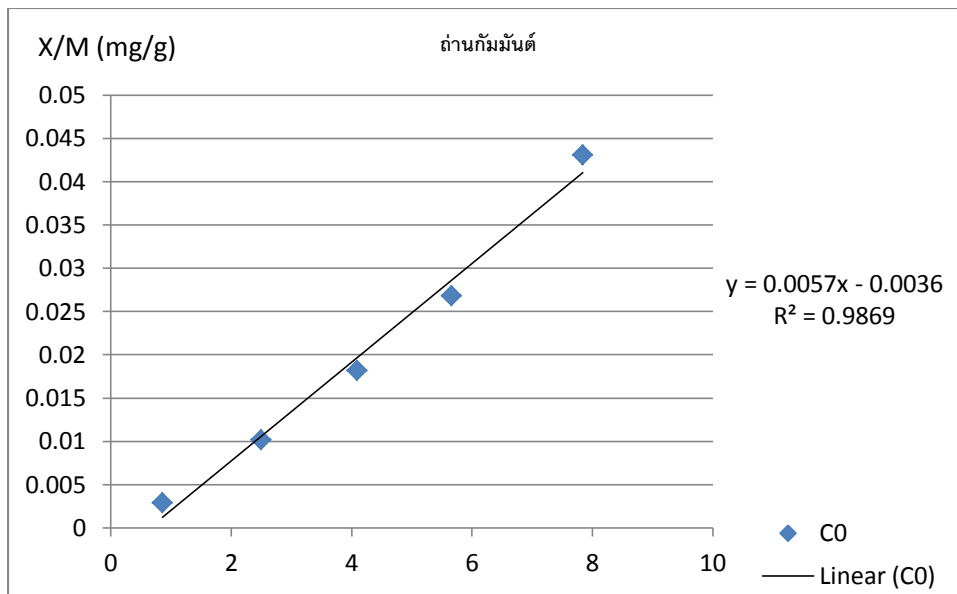


จ) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 10 mg/l

รูปที่ 4.6 (ต่อ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร

ก) P = 1 mg/l ข) P = 3 mg/l ค) P = 5 mg/l ง) P = 7 mg/l จ) P = 10 mg/l

จากข้อมูลดังกล่าว เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ 60 นาทีเพื่อหาไอโซเทิร์ม สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวกลาง (X/M , mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C_0 , mg/l) ได้ โดยใช้ค่าที่วัดที่เวลา 60 นาทีเป็นจุดสมมูลของการดูดซับ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (X/M, mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C₀, mg/l)

หากตั้งสมมุติฐานว่าไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบ Freundlich ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$q = KC^{\frac{1}{n}} \quad (4.6)$$

สมการสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\text{Log } q = \text{log } K + \left(\frac{1}{n}\right) \text{log } C \quad (4.7)$$

ซึ่งสามารถลากเส้นแนวโน้มได้ดังรูปที่ 4.8

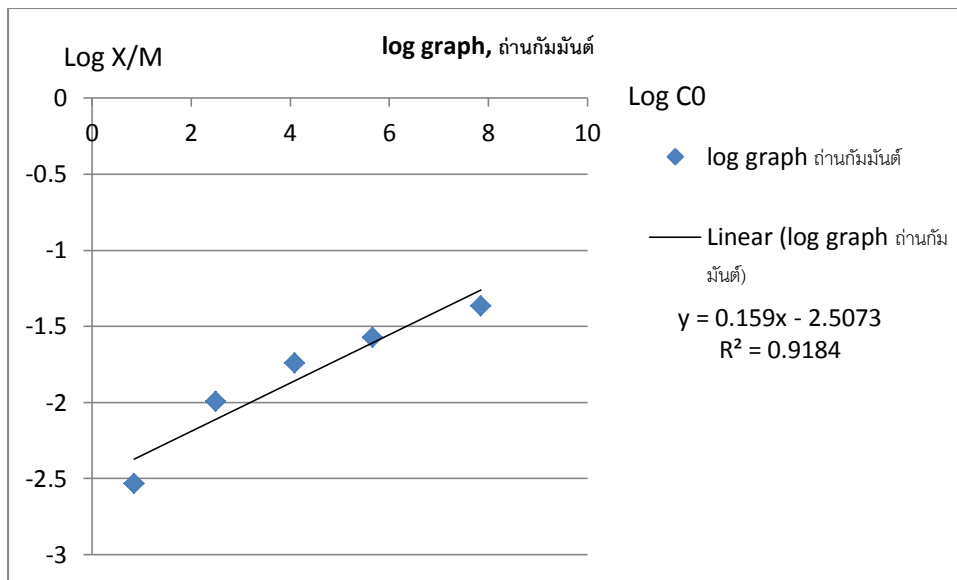
และสมการเส้นแนวโน้มคือ $y = 0.159x - 2.5073$

ได้ $1/n$ ของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเป็น 0.159

และ $\text{Log } K$ เป็น -2.5073 หรือ $K = 0.003$

ดังนั้นสมการของ Freundlich สำหรับการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตด้วยถ่านกัมมันต์จึงเป็น

$$q = (0.003)C^{0.159} \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.8 กราฟ $\text{Log } C_0$ กับ $\text{Log } \frac{X}{M}$ ของถ่านกัมมันต์ที่เวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้นต่างๆ กัน และเส้นแนวโน้มรวมทั้งสมการเส้นแนวโน้ม

เมื่อตั้งสมมุติฐานเป็นสมการแบบ Langmuir แล้วเขียนกราฟแนวโน้มระหว่าง $\frac{C_0}{X/M}$ กับ C_0 แล้วจะ

ได้ดังรูปที่ 4.9 และเมื่อทำการลากเส้นแนวโน้มเปรียบเทียบกับสมการ Langmuir

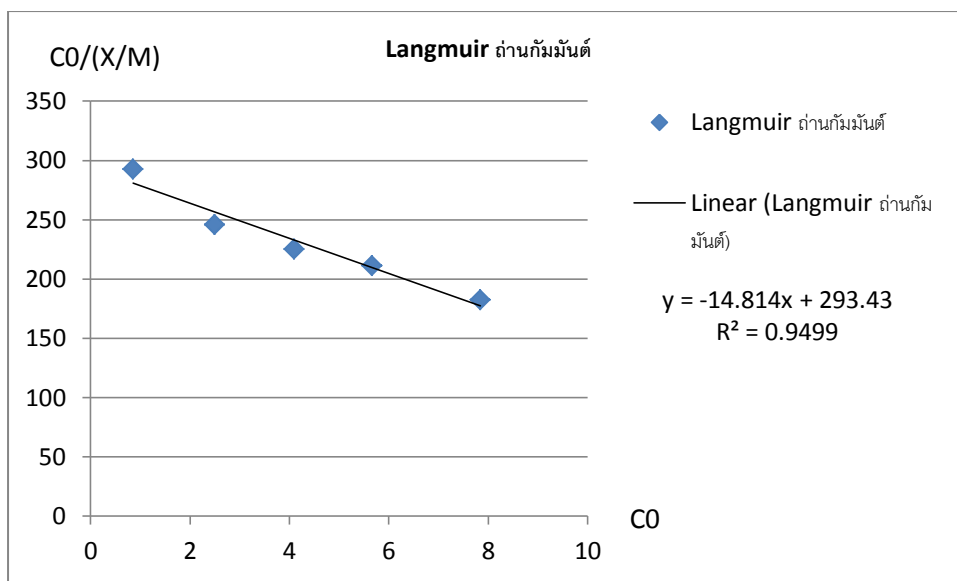
$$\frac{C_0}{X/M} = \frac{a}{q_m} + \frac{C_0}{q_m} \quad (4.9)$$

เราจะได้ค่า $\frac{a}{q_m}$ จากจุดตัดแกน y ซึ่งก็คือ 293.43

ขณะที่ค่า $\frac{1}{q_m}$ จะได้จากความชันของเส้นแนวโน้มซึ่งจากกราฟจะได้เป็น -14.814 mg P/g

ดังนั้นค่า a จึงเท่ากับ -19.81 L/mg P และสมการ Langmuir สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{C_0}{X/M} = -14.814C_0 + 293.43 \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{C_0}{\frac{X}{M}}$ กับ C_0 ของถ่านกัมมันต์ ที่จุดสมดุลความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ระยะเวลา 60 นาที และเส้นแนวโน้ม

เมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณที่ได้จากสมการ Freundlich กับสมการ Langmuir จะเห็นว่าค่า R^2 ของสองสมการนั้นอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันมาก โดยสมการ Langmuir จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า Freundlich อยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ การจะสรุปว่าสมการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับฟอสฟอรัสของถ่านกัมมันต์นั้นสามารถอธิบายได้ทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich

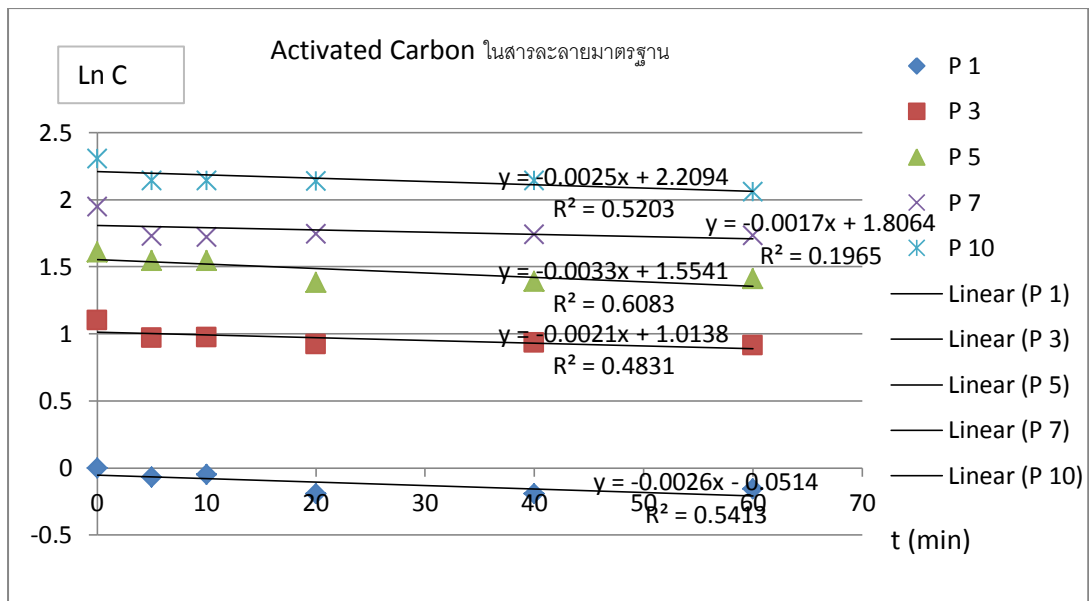
แต่กระนั้น จากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (X/M , mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C_0 , mg/l) ในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ชัดว่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของถ่านกัมมันต์ในช่วง 1-10 mg/l นั้นยังไม่ใช่อิมิตัวของถ่านกัมมันต์แต่ประการใด แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของถ่านกัมมันต์ในเงื่อนไขการทดลองดังกล่าวแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

สำหรับจลนศาสตร์การดูดซับหรือ Adsorption Kinetic นั้น จะสามารถตัด Zero Order Reaction ออกจากการพิจารณาได้เนื่องจากอัตราการดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

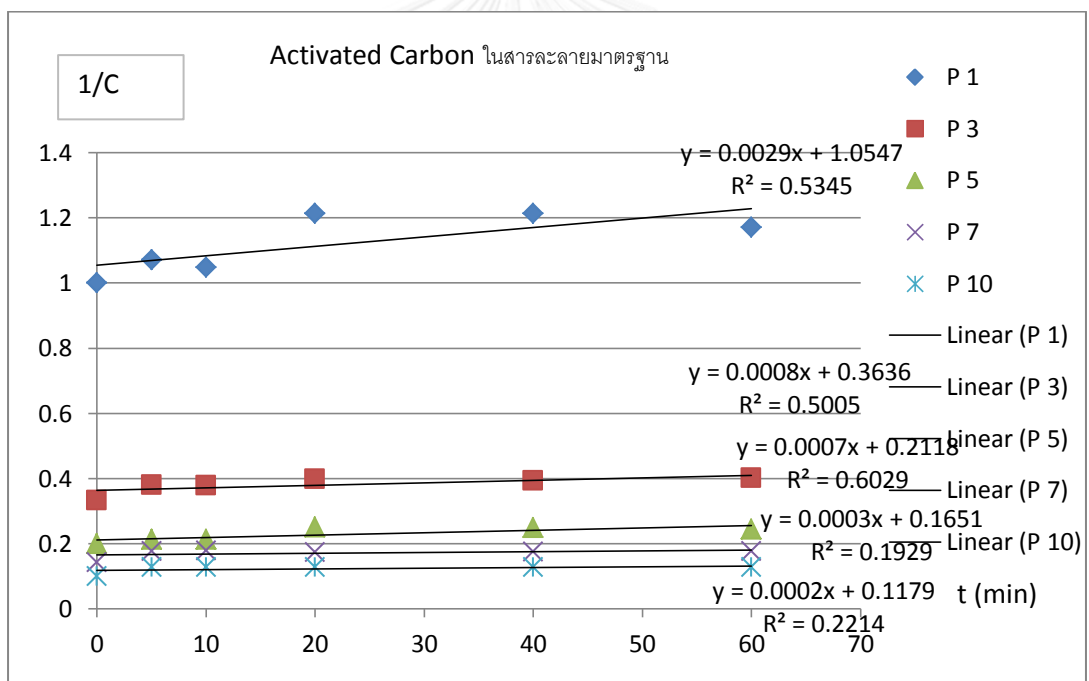
เมื่อตั้งสมมุติฐานว่าเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ First Order Reaction แล้ว จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log ความเข้มข้นกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.10 ก) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะมีค่า k อยู่ประมาณ 0.0033 min^{-1} และค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.47

เมื่อตั้งสมมุติฐานเป็น Second Order Reaction แล้ว จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/\text{ความเข้มข้น})$ กับเวลาได้ดังรูปที่ 4.10 ข) ซึ่งจากสมการเส้นแนวโน้ม พบว่าค่า k ควรจะมีค่าประมาณ 0.0007 min^{-1} และค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.41

แม้เมื่อพิจารณาจาก R^2 เฉลี่ยของกราฟความสัมพันธ์ทั้งสองแล้วจะพบว่าสมมุติฐานว่าปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสโดยถ่านกัมมันต์ควรจะเป็นแบบ First Order Reaction แต่เนื่องจากค่า R^2 เฉลี่ยที่ต่ำกว่า 0.5 ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าจลนศาสตร์การดูดซับฟอสฟอรัสของถ่านกัมมันต์จะเป็นรูปแบบอื่นที่มีใช้รูปแบบมาตรฐานทั้งสามที่นำมาพิจารณา



ก) Ln ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับเวลา



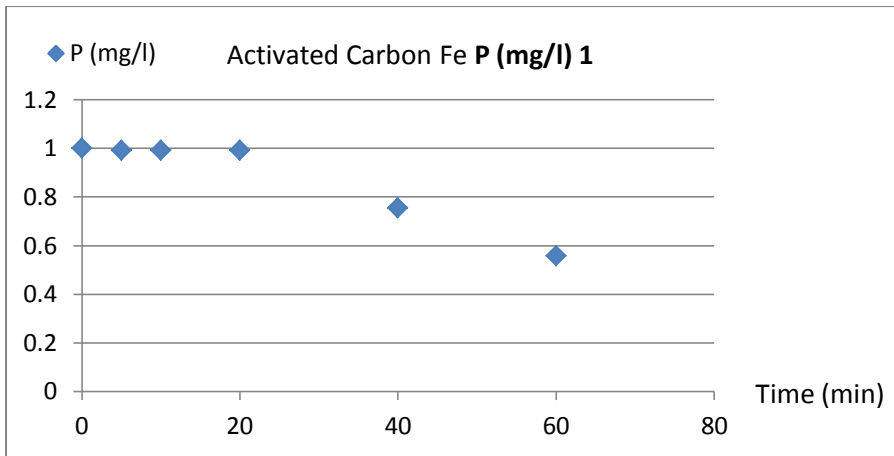
ข) 1/ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับเวลา

รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่กวนผสมกับ ถ่านกัมมันต์กับเวลา

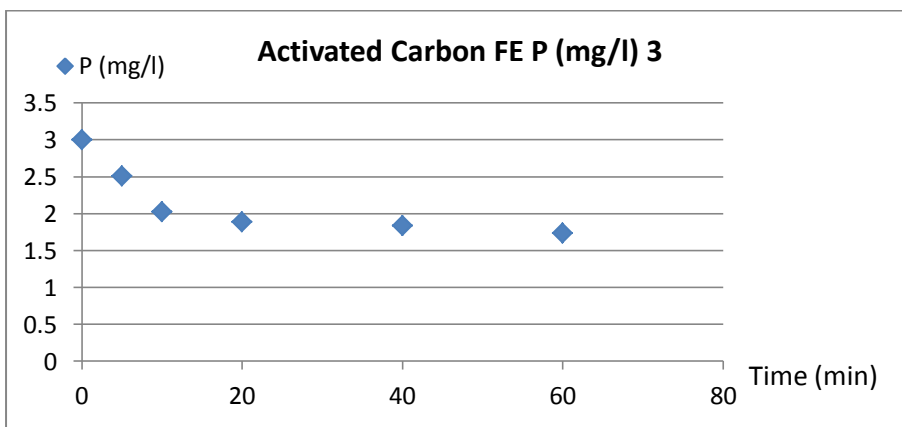
4.1.1 ค) ไอโซเทิร์มของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

การดำเนินการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร กับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความเข้มข้น 1 mg/l แสดงให้เห็นว่าเมื่อครบเวลา 60 นาทีแล้วยังคงมีการดูดซับเกิดขึ้นอยู่ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเริ่มต้นที่ 3 mg/l จะเริ่มถึงจุดสมดุลที่เวลา 20 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mg/l จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ และเริ่มมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าลงเมื่อถึงระยะเวลา 60 นาที ขณะที่ที่ความเข้มข้น 7 mg/l และ 10 mg/l จะลดลงอย่างรวดเร็วและเริ่มถึงจุดสมดุลในเวลาประมาณ 40 - 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11

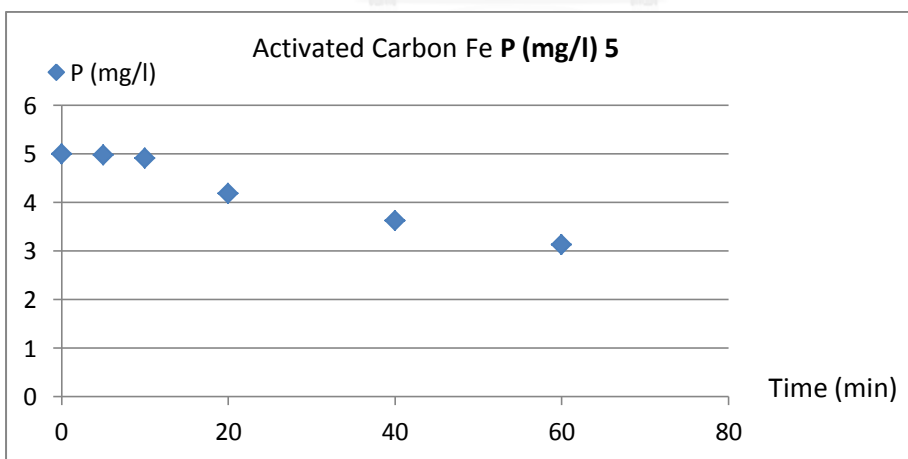




ก) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 1 mg/l



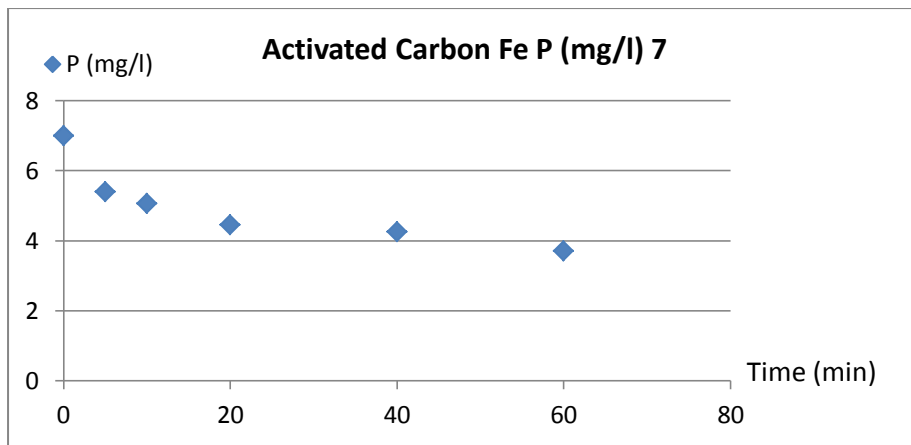
ข) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 3 mg/l



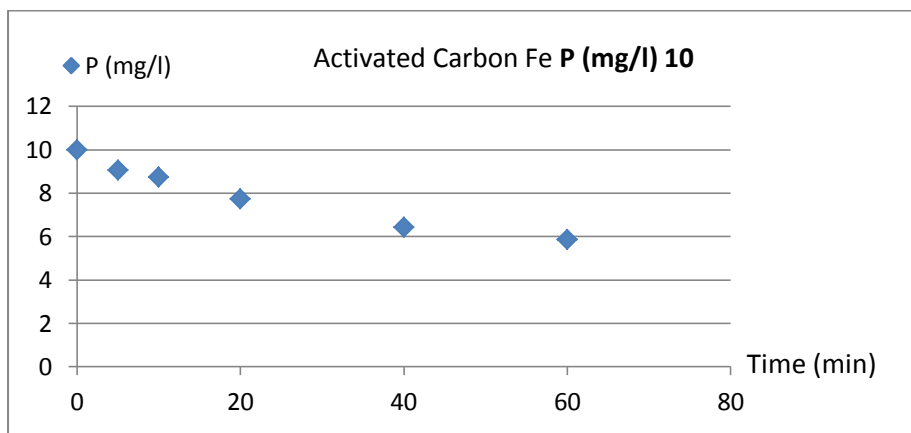
ค) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 5 mg/l

รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร

ก) P = 1 mg/l ข) P = 3 mg/l ค) P = 5 mg/l ง) P = 7 mg/l จ) P = 10 mg/l



ง) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 7 mg/l

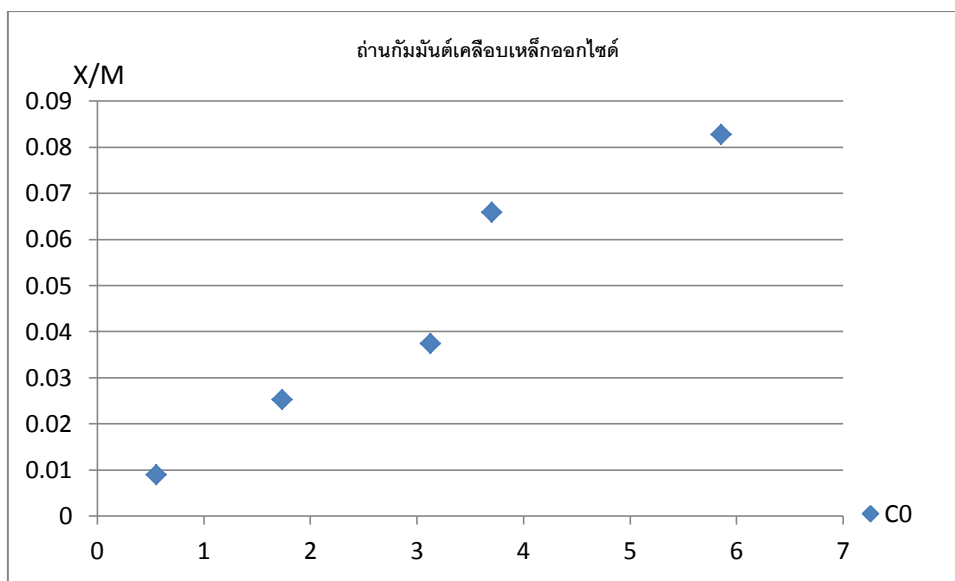


จ) ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้น 10 mg/l

รูปที่ 4.11 (ต่อ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร

ก) $P = 1 \text{ mg/l}$ ข) $P = 3 \text{ mg/l}$ ค) $P = 5 \text{ mg/l}$ ง) $P = 7 \text{ mg/l}$ จ) $P = 10 \text{ mg/l}$

จากข้อมูลดังกล่าว เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ 60 นาทีเพื่อหาไอโซเทอรั่ม สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวกลาง (X/M , mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C_0 , mg/l) ได้ โดยใช้ค่าที่วัดที่เวลา 60 นาทีเป็นจุดสมมูลของการดูดซับ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ (X/M, mg/g) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหลืออยู่ (C₀, mg/l)

หากตั้งสมมุติฐานว่าไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบ Freundlich ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$q = KC^{\frac{1}{n}} \quad (4.11)$$

สมการสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\text{Log } q = \text{log } K + \left(\frac{1}{n}\right) \text{log } C \quad (4.12)$$

ซึ่งจะทำให้เราสามารถลากเส้นแนวโน้มได้ดังรูปที่ 4.13

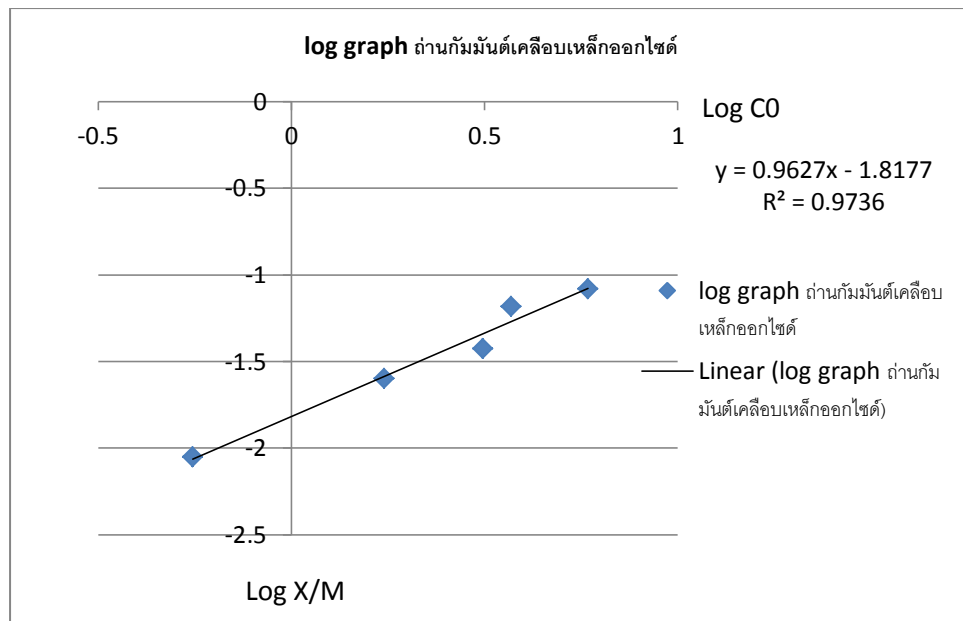
และสมการเส้นแนวโน้มคือ $y = 0.9627x - 1.8177$

ได้ $1/n$ ของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเป็น 0.9627

และ $\text{Log } K$ เป็น -1.8177 หรือ $K = 0.0133$

ดังนั้นสมการของ Freundlich สำหรับการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตด้วยถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จึงเป็น

$$q = (0.0133)C^{0.9627} \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.13 กราฟ $\text{Log } C_0$ กับ $\text{Log } \frac{X}{M}$ ของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่เวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเริ่มต้นต่างๆ กัน และเส้นแนวโน้มรวมทั้งสมการเส้นแนวโน้ม

เมื่อตั้งสมมุติฐานเป็นสมการแบบ Langmuir แล้วเขียนกราฟแนวโน้มระหว่าง $\frac{C_0}{X/M}$ กับ C_0 แล้วจะ

ได้ดังรูปที่ 4.14 และเมื่อทำการลากเส้นแนวโน้มเปรียบเทียบกับสมการ Langmuir

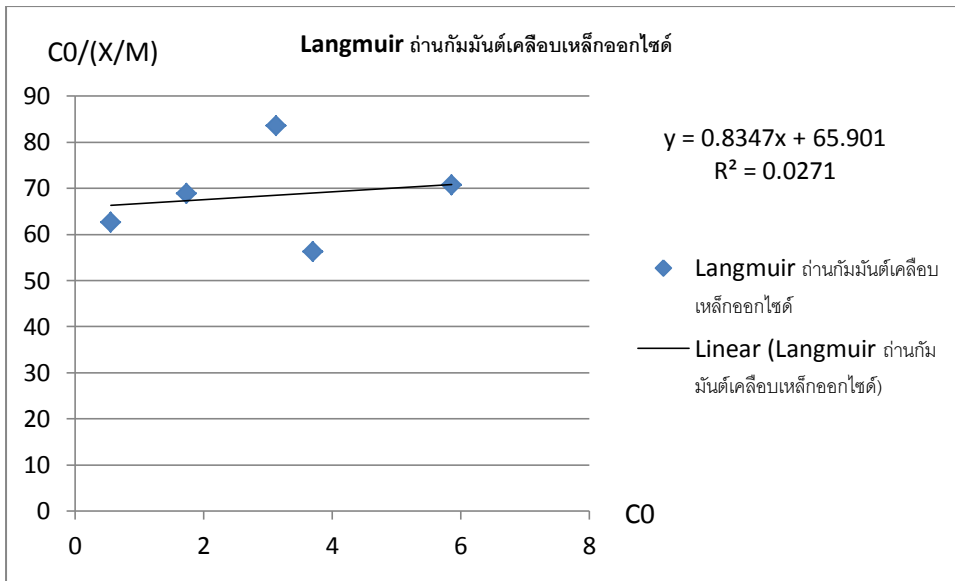
$$\frac{C_0}{X/M} = \frac{a}{q_m} + \frac{C_0}{q_m} \quad (4.14)$$

เราจะได้ค่า q_m จากจุดตัดแกน y ซึ่งก็คือ 65.901 เท่ากับค่า $\frac{a}{q_m}$

ขณะที่ค่า $\frac{1}{q_m}$ จะได้จากความชันของเส้นแนวโน้มซึ่งจากกราฟจะได้เป็น 0.8347 mg P/g

ดังนั้นค่า a จึงเท่ากับ 78.95 L/mg P และสมการ Langmuir สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{C_0}{X/M} = 0.8347C_0 + 65.901 \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_0 / \frac{X}{M}$ กับ C_0 ของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่จุด

สมดุลความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ระยะเวลา 60 นาที และเส้นแนวโน้ม

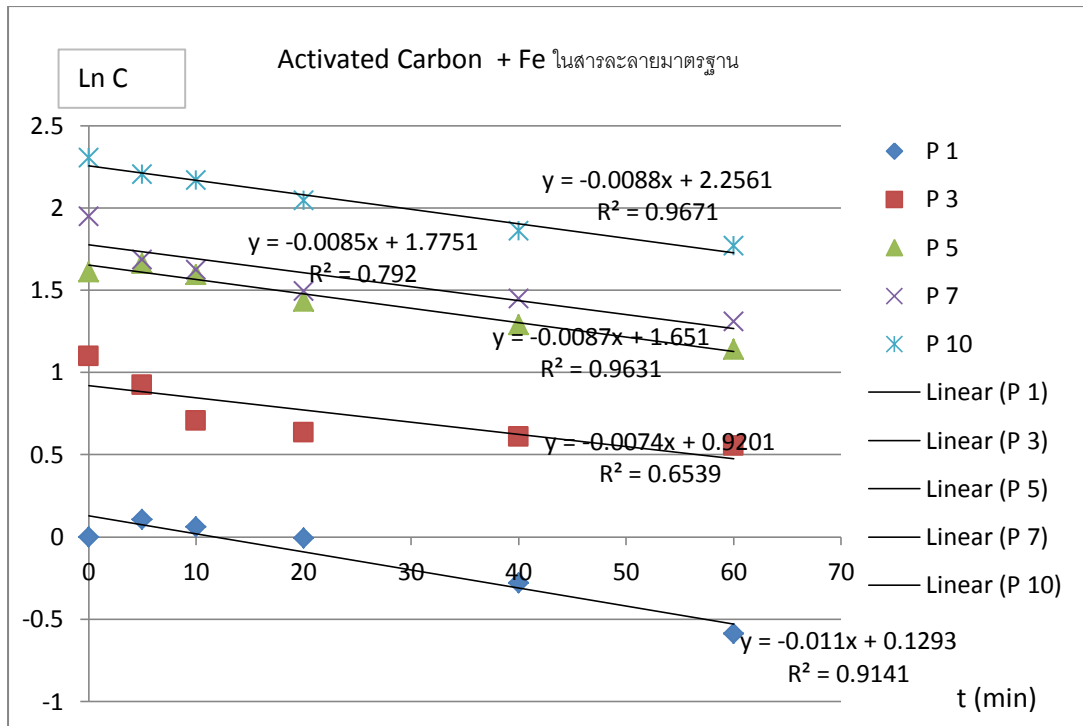
เมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณที่ได้จากสมการ Freundlich กับสมการ Langmuir จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยความคลาดเคลื่อนของสมการ Langmuir ที่คำนวณได้จากการทดลองจะสูงมากกว่าสมการ Freundlich ดังนั้นสมการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตโดยถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จึงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบ Freundlich

สำหรับจลนศาสตร์การดูดซับหรือ Adsorption Kinetic นั้น เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เราจึงสามารถตัด Zero Order Reaction ที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเปลี่ยนแปลงของสารที่ทำปฏิกิริยาออกจากตัวเลือก

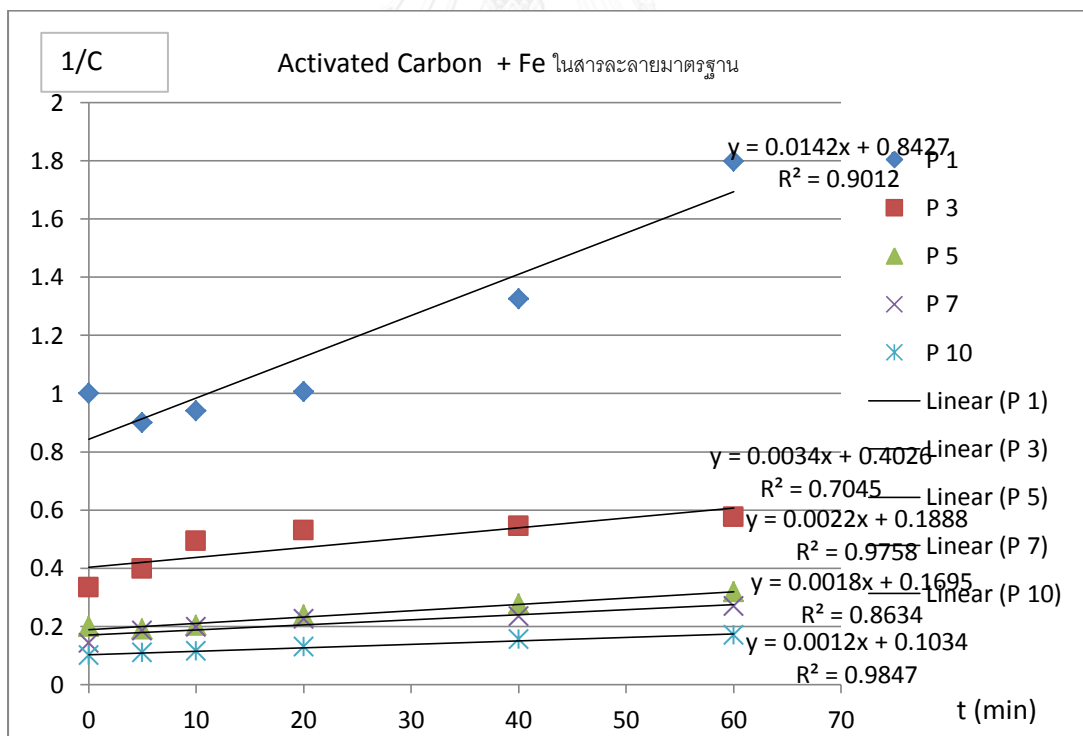
เมื่อตั้งสมมุติฐานว่าเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ First Order Reaction แล้ว จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log ความเข้มข้นกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.15 ก) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะมีค่า k อยู่ประมาณ 0.0088 min^{-1} และค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.86

เมื่อตั้งสมมุติฐานเป็น Second Order Reaction แล้ว จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/\text{ความเข้มข้น})$ กับเวลาได้ดังรูปที่ 4.15 ข) ซึ่งจากสมการเส้นแนวโน้ม พบว่าค่า k ควรจะมีค่าประมาณ 0.0012 min^{-1} และค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.89

เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 เฉลี่ยของกราฟทั้งสองรูปแบบจลนศาสตร์การดูดซับแล้วจะพบว่าจลนศาสตร์การดูดซับแบบ Second Order จะสามารถอธิบายได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า และเนื่องจากค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.89 จึงทำให้ค่อนข้างแน่ใจว่าจลนศาสตร์การดูดซับฟอสฟอรัสโดยถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เป็นแบบ Second Order



ก) Ln ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับเวลา



ข) 1/ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับเวลา

รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่กวนผสมกับ ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ 50 g/L กับเวลา

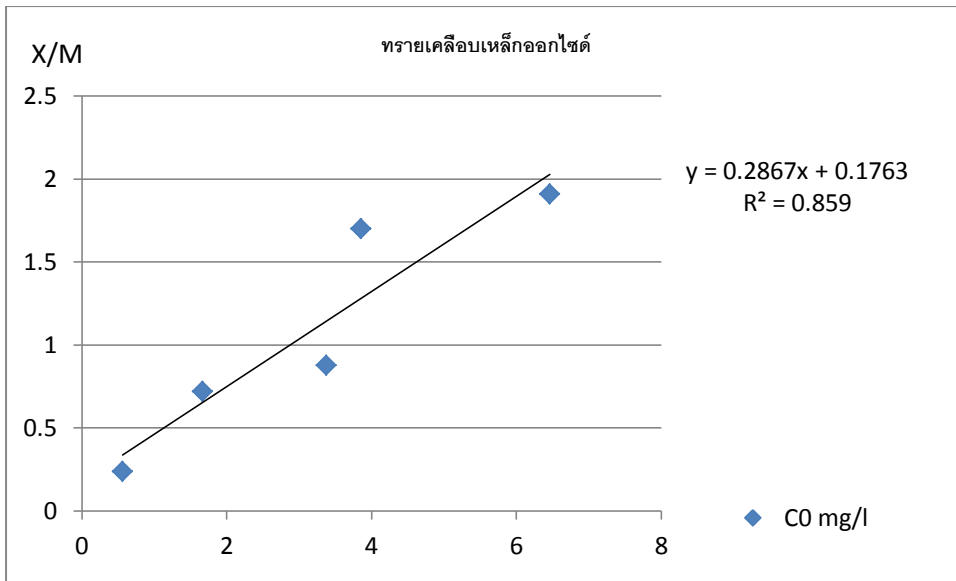
4.1.1 ง) เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาและอัตราส่วนมวลสารที่ดูดซับกับมวลตัวกลาง (X/M) ที่เวลา 60 นาที

จากผลการทดลองดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตความเข้มข้นต่างกันโดยใช้อัตราส่วนตัวกลางที่ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร จะพบว่าที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 1 mg/l นั้นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะมีค่า X/M ใกล้เคียงกันที่ 0.0088 และ 0.0087 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งก็ไม่แตกต่างกันนักกับการคำนวณที่ได้จากความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 3 mg/l ที่ทั้งสองตัวกลางมีค่า X/M ที่ 0.0266 และ 0.0252 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตสูงขึ้น ค่า X/M ของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นตั้งต้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 10 mg/l ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะมีค่า X/M อยู่ที่ 0.0707 และ 0.0828 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์นั้นจะมีค่า X/M ต่ำที่สุด โดยที่สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 1 mg/l มี X/M ที่ 0.0029 และค่าสูงสุดที่สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 10 mg/l ที่มี X/M 0.0431 มิลลิกรัมต่อกรัม (รูปที่ 4.2, รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.12)

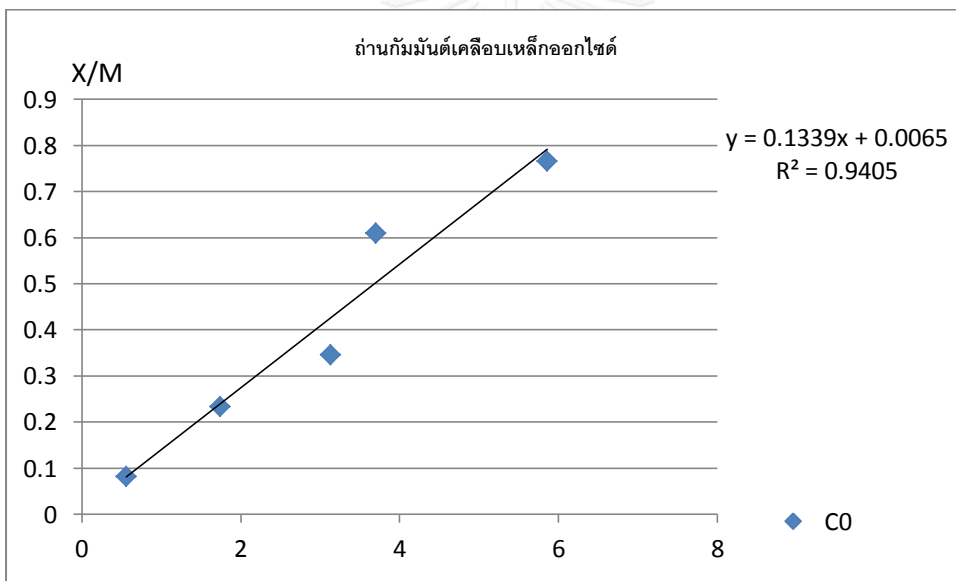
แต่ทว่าเมื่อนำกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางมาพิจารณาด้วยแล้วจะพบว่า ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นมีเพียงเหล็กออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในน้ำ ดังนั้นหากคิดเฉพาะมวลของเหล็ก (อ้างอิงภาคผนวก ค.) จะพบว่าในตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 5 กรัมจะมีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่ 0.185 กรัม และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ 5 กรัมจะมีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่ 0.54 กรัม ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของความแตกต่างนี้มาจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่สำหรับให้อนุภาคยึดเกาะมากกว่าทรายในน้ำหนักที่เท่ากันทำให้มีเหล็กออกไซด์เกาะกับถ่านกัมมันต์มากกว่าเมื่อพิจารณาที่ 60 นาทีจะพบว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่า X/M สูงกว่าอันเนื่องมาจากปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มีอยู่น้อยกว่าบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์และปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่มีอยู่จำกัดในระบบ Batch ดังในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนมวลฟอสฟอรัสต่อมวลตัวกลางของตัวกลางต่างชนิดกันหลังจากการกวนผสมเป็นเวลา 60 นาที

	X/M ที่ 60 นาที	X/M ที่ 60 นาที	X/M ที่ 60 นาที	X/M ที่ 60 นาที	X/M ที่ 60 นาที
ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง	P 1 mg/l	P 3 mg/l	P 5 mg/l	P 7 mg/l	P 10 mg/l
ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์	0.0088	0.0266	0.0325	0.0629	0.0707
ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (เหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิว)	0.2378	0.7198	0.8775	1.7009	1.9107
ถ่านกัมมันต์	0.0029	0.0101	0.0181	0.0268	0.0431
ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์	0.0089	0.0252	0.0374	0.0659	0.0828
ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ (เหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิว)	0.0822	0.2337	0.3466	0.6103	0.7668



ก) ทรายเป็นเคลือบเหล็กออกไซด์



ข) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

รูปที่ 4.16 กราฟ X/M ของตัวกลางทรายเป็นเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ ซึ่งคิดคำนวณเฉพาะ “เหล็กออกไซด์” ที่เคลือบบนพื้นผิวของตัวกลางเป็นตัวดูดซับหลัก

ก) ทรายเป็นเคลือบเหล็กออกไซด์

ข) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

สำหรับค่าคงที่ของ Adsorption Kinetic ของปฏิกิริยาดูดซับฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้น นั้น ค่าของถ่านกัมมันต์จะต่ำที่สุด ตามมาด้วยค่าของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ และสุดท้ายคือทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่สูงที่สุด ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนแต่สอดคล้องกับพฤติกรรมการกำจัดฟอสฟอรัสที่ได้จากผลการทดลองที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะถึงจุดสมดุลเร็วที่สุดแต่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ส่วนในกรณีของถ่านกัมมันต์ที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยมากที่สุดในสามตัวกลางที่นำมาทำการวิจัยนั้น เมื่อดูจากลักษณะการดูดซับที่อาจเป็นไปได้ทั้ง Langmuir และ Freundlich แล้วจะพบว่าพฤติกรรมการดูดซับน่าจะสอดคล้องกับ Langmuir ซึ่งเป็นการเกาะติดชั้นเดียวระหว่างตัวกลางกับฟอสฟอรัสมากกว่าแบบ Freundlich และอนุภาคของฟอสฟอรัสน่าจะมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนบนถ่านกัมมันต์ดังกล่าว

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า k ในปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

	$k (t^{-1})$ 1 st Order	$k (t^{-1})$ 2 nd Order
ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์	0.0384	0.0042
ถ่านกัมมันต์	0.0033	0.0007
ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์	0.0088	0.0012

4.1.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับฟอสฟอรัสในระบบ Batch ของตัวกลางชนิดต่างๆ กับน้ำเสียที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากน้ำเสียจริงที่ใช้ทดลองนั้นจะมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ออกมาใกล้เคียงกันเพราะนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแหล่งเดียวกัน จึงต้องใช้ในการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวกลางดูดซับเพื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรและผลลัพธ์ รวมถึงต้องมีการวัดค่า COD และ pH เพื่อหาความสัมพันธ์กับการดูดซับฟอสฟอรัสด้วย หากแต่เนื่องจากคุณภาพน้ำที่นำมาใช้ในการทดลองแตกต่างกันออกไปในแต่ละวันขึ้นกับลักษณะการใช้น้ำในอาคาร สำหรับน้ำเสียที่นำมาทำการทดลองในการศึกษานี้มีสมบัติต่างๆ ทั้งค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดดังในตารางที่ 4.3 ต่อไปนี้ ซึ่งทำการวัดในช่วงเวลาระหว่าง มกราคม 2557- เมษายน 2557

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติน้ำทิ้งอาคารที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียอาคารมหิตลาธิเบศร คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติน้ำทิ้งอาคาร	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
COD (mg/l)	46.5	60	17.35
pH	6.0	7.2	5.0
OrganicP (mg/l)	6.41	6.63	4.57

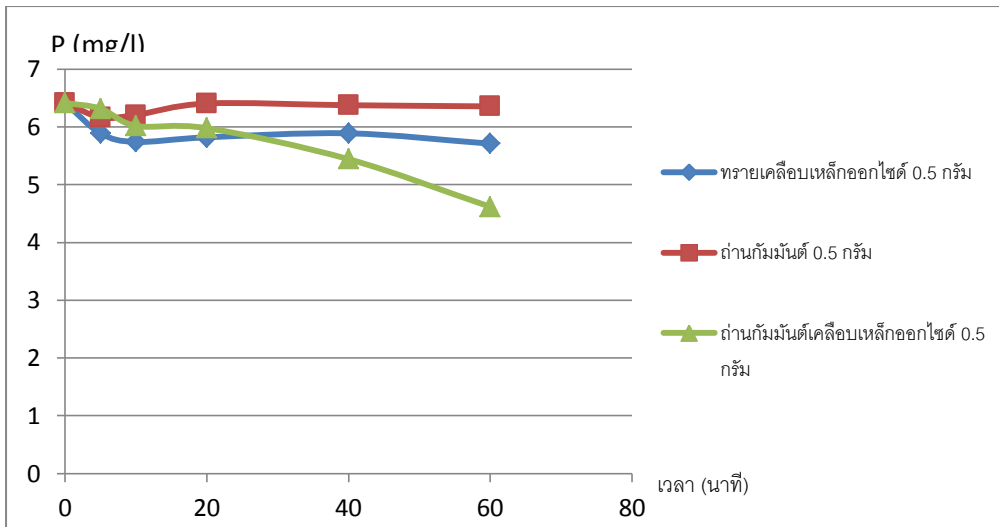
จะเห็นได้ว่าค่าฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียอาคารมหิตลาธิเบศร ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (มกราคม – เมษายน 2557) นั้นจะมีค่าอโรฟอสฟอรัสที่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนของต่างประเทศในตารางที่ 2.3 ที่ 0.5 mg/l ขณะที่ค่า COD และ pH นั้นจะอยู่ต่ำกว่ามาตรฐานกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมไทยที่กำหนดไว้ที่ 120 mg/l และค่า pH ซึ่งกำหนดมาตรฐานไว้ที่ 5-9 ตามลำดับ การทดลองนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การบำบัดความเข้มข้นฟอสฟอรัสส่วนที่เกินจากมาตรฐานที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ โดยมีเป้าหมายขั้นต่ำคือลดค่าความเข้มข้นลงให้น้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งดังกล่าว ขณะที่การวิเคราะห์ค่า COD และ pH นั้นทำเพื่อติดตามผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นจากตัวกลางที่นำมาใช้ในการดูดซับ

4.1.2 ก) การเปรียบเทียบการดูดซับฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งอาคารในระบบ Batch ระหว่างตัวกลาง ต่างชนิดที่ปริมาณตัวกลางต่างๆ กันในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร กวนผสมเป็นเวลา 60 นาที

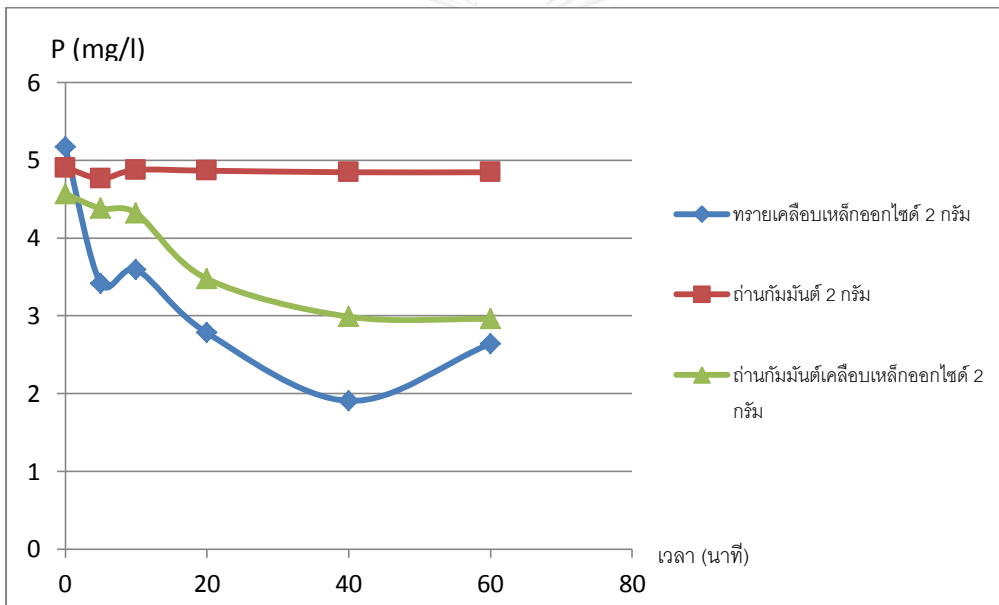
จากการทดลองพบว่า ที่ปริมาณตัวกลางเท่าๆ กันถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ต่ำที่สุดในตัวกลางทั้งสามตัว โดยการเพิ่มปริมาณตัวกลางในน้ำทิ้งปริมาณคงที่ 100 ml จะไม่ทำให้ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งลดลงมากอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการลดลงของความเข้มข้นฟอสฟอรัสจะแปรผันตรงกับปริมาณตัวกลางที่ใส่ลงไปอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.6 mg/l จากค่าตั้งต้นภายในช่วงเวลา 60 นาที คิดเป็น 1.7% - 10% ของค่าตั้งต้นในเวลา 60 นาที

สำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จาก 5 กรัมต่อลิตรเป็น 20 กรัมต่อลิตร โดยสามารถลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งได้ 0.7 ถึง 2.57 mg/l จากค่าเริ่มต้นเฉลี่ย 5.6 mg/l ตามลำดับ หรือคิดเป็น 12.5% และ 45% ภายในเวลา 60 นาทีตามลำดับ หากแต่การเพิ่มปริมาณปริมาณความเข้มข้นของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จาก 5 กรัมต่อลิตรเป็น 20 กรัมต่อลิตรนั้นจะเพิ่มอัตราการดูดซับเพียงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์หรือสามารถลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งได้ประมาณ 3 mg/l หรือ 53% จากค่าตั้งต้นในเวลา 60 นาที และอัตราการลดลงจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 2 - 3 mg/l จากค่าตั้งต้นในเวลา 60 นาทีแม้จะเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็น 70 และ 100 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ลักษณะการลดลงต่อระยะเวลาจะมีกราฟแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อนจะชะลอลงและเริ่มลดความชันของเส้นกราฟลงจนเป็นเส้นตรงอีกครั้งเมื่อใกล้ถึงเวลา 60 นาที

ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ดูจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากที่สุด หากแต่พฤติกรรมการดูดซับในช่วงเวลา 60 นาทีจะคล้ายคลึงกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ คือสามารถทำให้ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียลดลงได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลาง โดยตัวกลางปริมาณ 0.5 กรัม สามารถบำบัดฟอสฟอรัสไปได้เพียง 27.9% หรือจากความเข้มข้น 6.41 mg/l มาเป็น 4.61 mg/l ในเวลา 60 นาที เมื่อความเข้มข้นของตัวกลางเพิ่มขึ้นเป็น 20 กรัมต่อลิตรสามารถบำบัดได้ 50.06% หรือจากความเข้มข้นเริ่มต้น 5.17 mg/l ลงมาเป็น 2.64 mg/l และอัตราการบำบัดที่เวลา 60 นาทีของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50, 70 และ 100 กรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ใช้ ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.17



ก) ตัวกลางปริมาณ 5 g/l กวนผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที

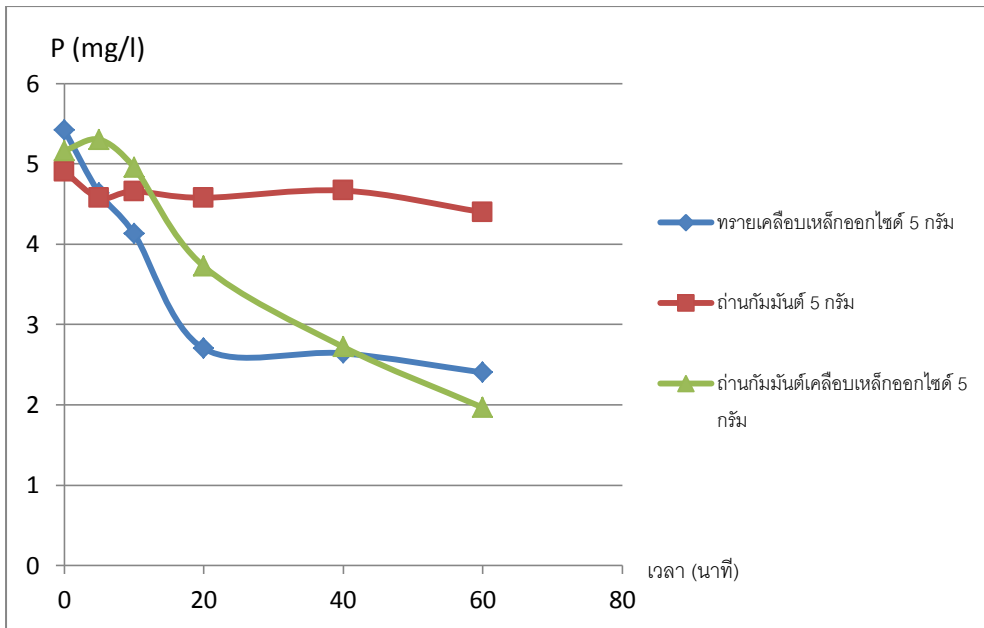


ข) ตัวกลางปริมาณ 20 g/l กวนผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที

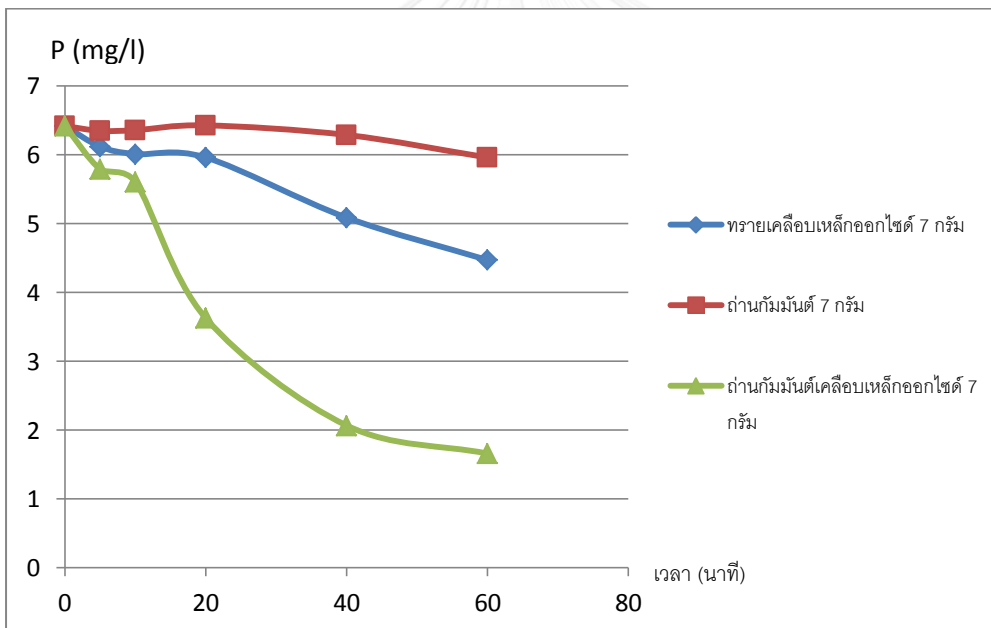
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิดในระยะเวลา 60 นาที

ก) ปริมาณตัวกลาง 5 g/l ข) ปริมาณตัวกลาง 20 g/l ค) ปริมาณตัวกลาง 50 g/l

ง) ปริมาณตัวกลาง 70 g/l จ) ปริมาณตัวกลาง 100 g/l



ค) ตัวกลางปริมาณ 50 g/l กวณผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที

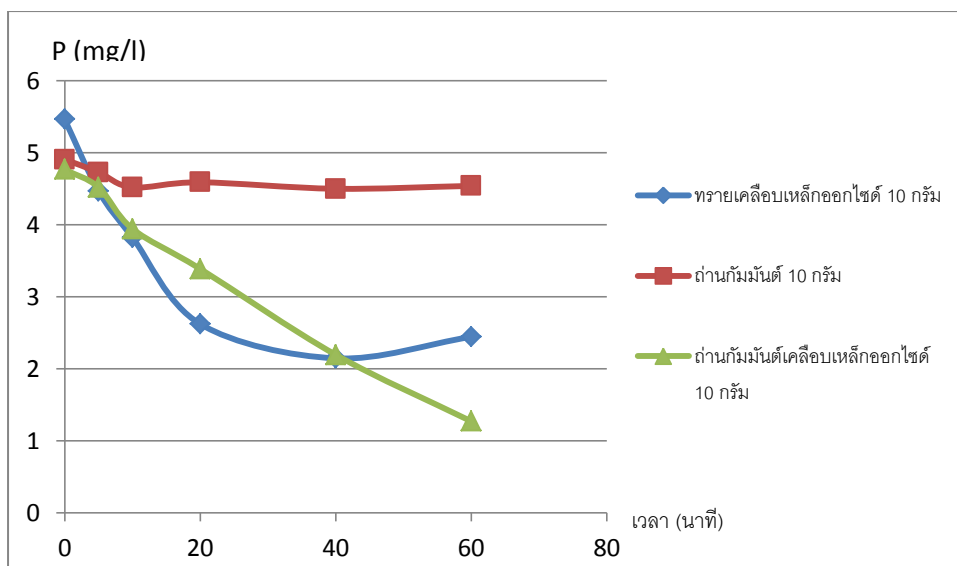


ง) ตัวกลางปริมาณ 70 g/l กวณผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที

รูปที่ 4.17 (ต่อ) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิด ทราวยเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ก) ปริมาณตัวกลาง 5 g/l ข) ปริมาณตัวกลาง 20 g/l ค) ปริมาณตัวกลาง 50 g/l

ง) ปริมาณตัวกลาง 70 g/l จ) ปริมาณตัวกลาง 100 g/l



จ) ตัวกลางปริมาณ 100 g/l กวนผสมเป็นระยะเวลา 60 นาที

รูปที่ 4.17 (ต่อ) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิด ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

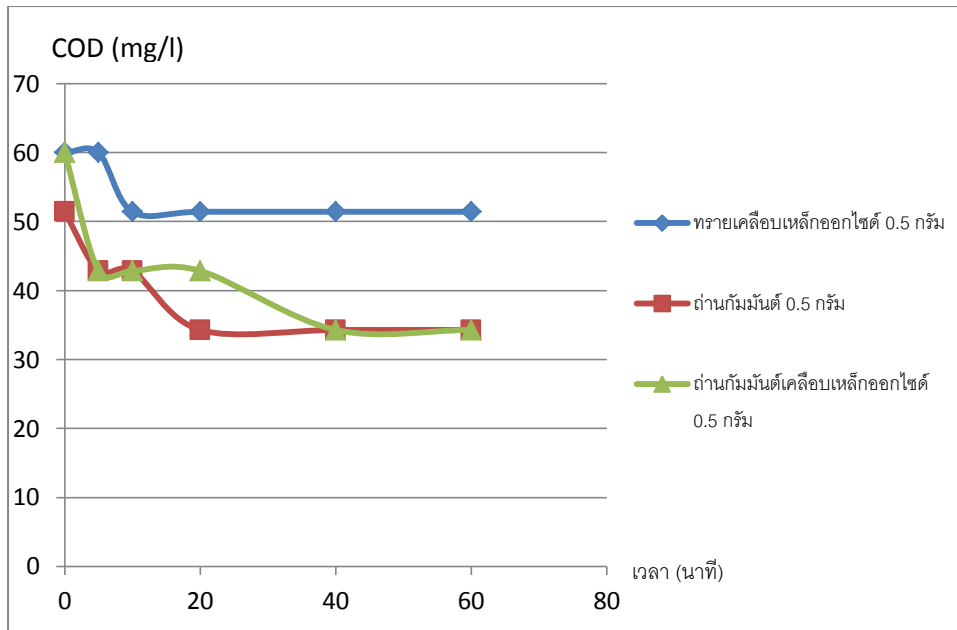
ก) ปริมาณตัวกลาง 5 g/l ข) ปริมาณตัวกลาง 20 g/l ค) ปริมาณตัวกลาง 50 g/l

ง) ปริมาณตัวกลาง 70 g/l จ) ปริมาณตัวกลาง 100 g/l

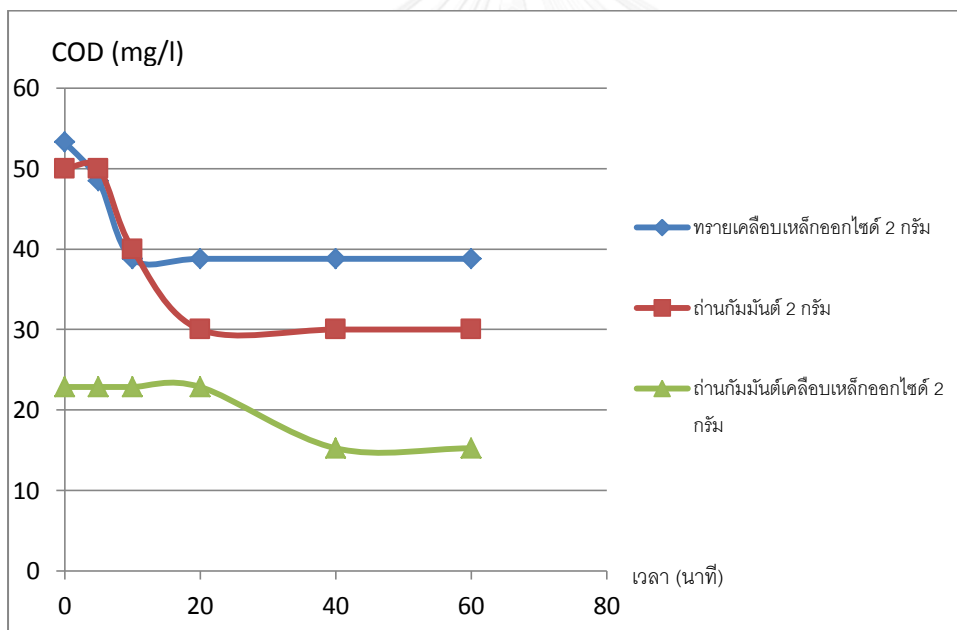
4.1.2 ข) การเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของ COD จากน้ำทิ้งอาคารในระบบ Batch ระหว่างตัวกลาง 3 ชนิดที่ปริมาณตัวกลางต่างๆ กันในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร

จากการทดลองจะพบว่าในปริมาณตัวกลางถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ 0.5 – 2 กรัม ค่า COD ที่เวลา 60 นาทีจะลดลงไปประมาณ 50% ขณะที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นจะสามารถลดค่า COD ไปประมาณ 16% ในเวลากวนผสมที่ 60 นาทีเท่านั้น

เมื่อปริมาณตัวกลางเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะเป็นรองถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์อย่างเห็นได้ชัดซึ่งไม่มีประสิทธิภาพการกำจัดมากไปกว่า 33% ของค่า COD เริ่มต้น หากแต่ความแตกต่างระหว่างถ่านกัมมันต์กับถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัด COD นั้นจะยังไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจนกระทั่งปริมาณตัวกลางในน้ำทิ้งมีมากกว่า 7 กรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการลด COD ถึง 75% จากค่าตั้งต้น ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถลดได้เพียงประมาณ 50% เท่านั้น ดังรูปที่ 4.18

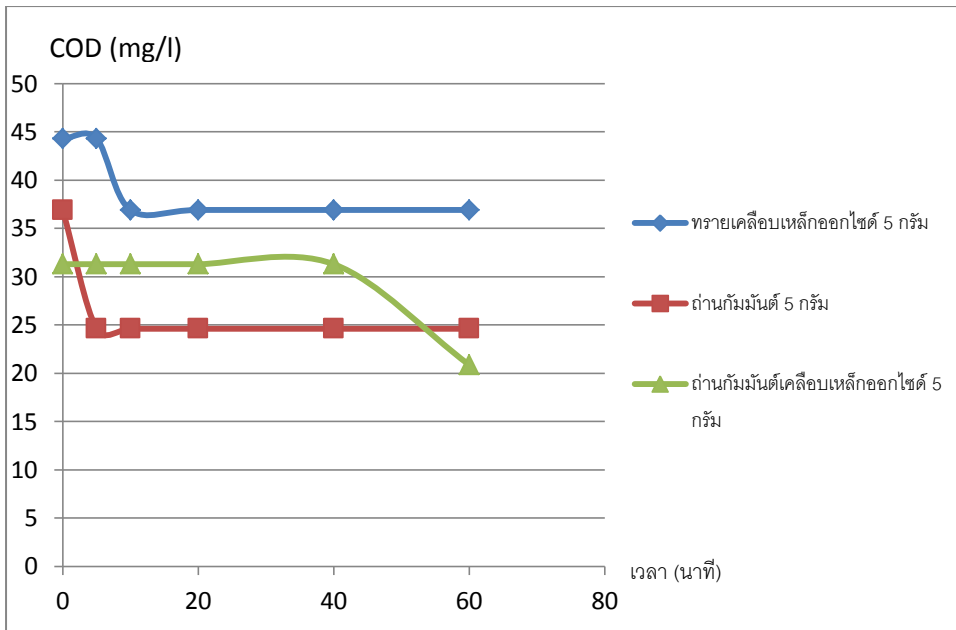


ก) ตัวกลางความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร

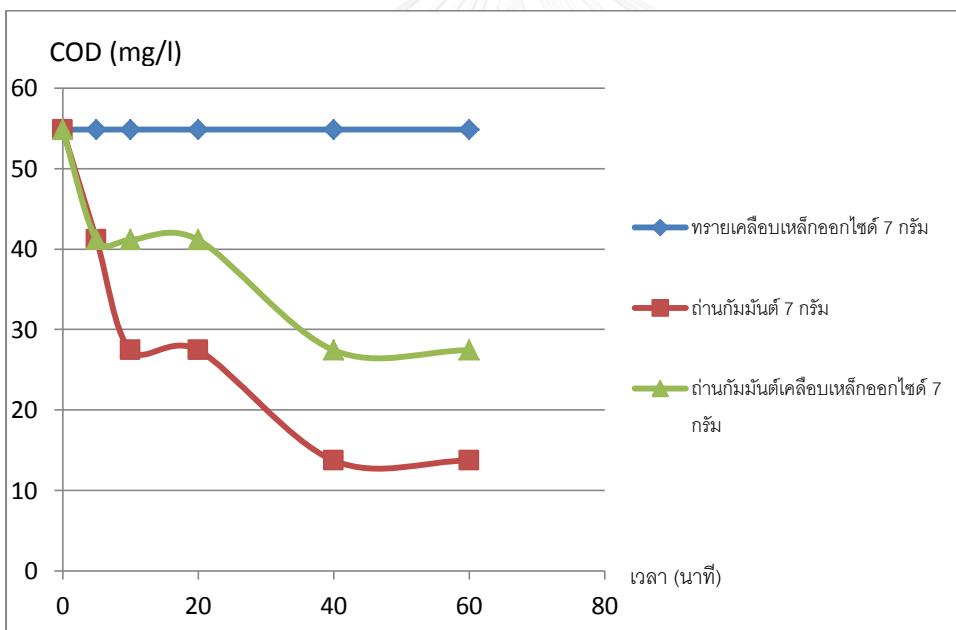


ข) ตัวกลางความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิด ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

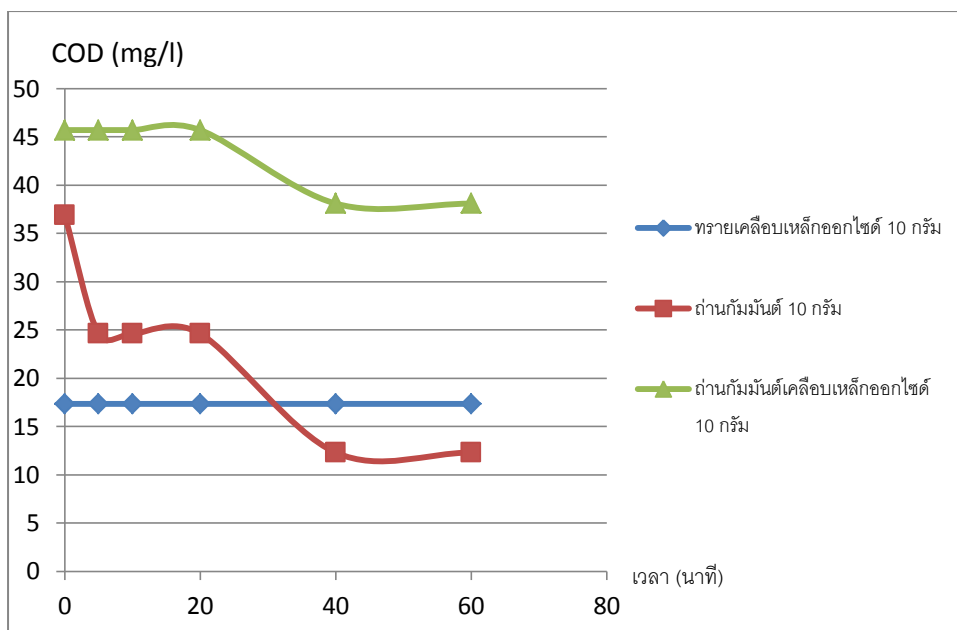


ค) ตัวกลางความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร



ง) ตัวกลางความเข้มข้น 70 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.18 (ต่อ) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิด ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

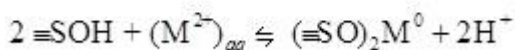
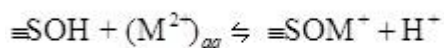
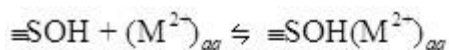


จ) ตัวกลางความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.18 (ต่อ) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง COD ในน้ำทิ้งโดยการดูดซับของตัวกลาง 3 ชนิด ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

4.1.2 ค) การเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงค่า pH จากน้ำทิ้งอาคารในระบบ Batch ระหว่างตัวกลาง 3 ชนิดที่ปริมาณตัวกลางต่างๆ กันในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร

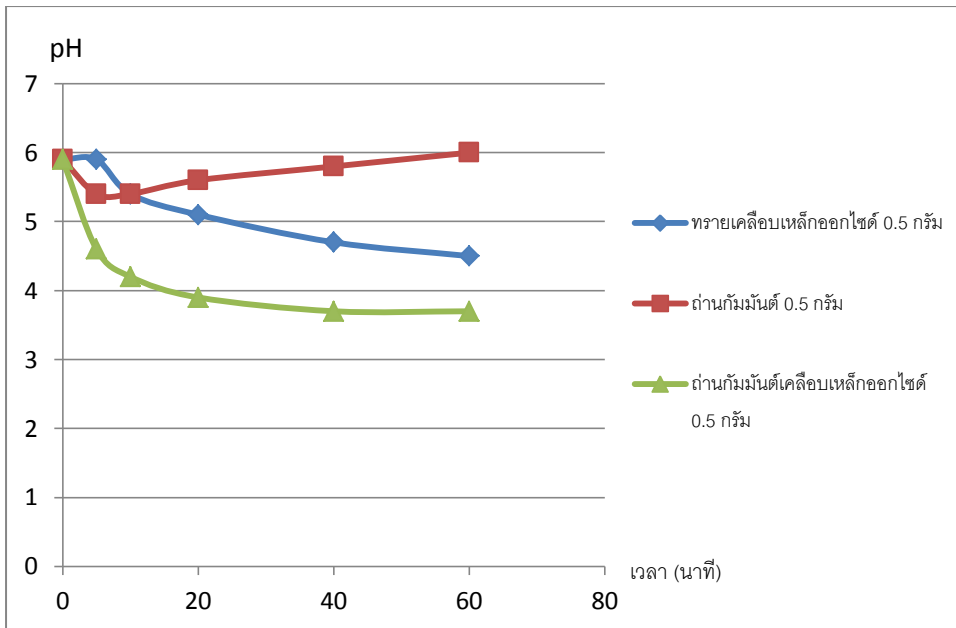
จากการศึกษาพบว่าปริมาณของตัวกลางในน้ำทิ้งในระบบ Batch จะส่งผลกระทบต่อตรงค่า pH ของน้ำ โดยถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะทำให้ค่า pH ลดลงตามระยะเวลาที่กวนผสม ขณะที่ถ่านกัมมันต์จะทำให้ค่า pH สูงขึ้น โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของ pH จะเป็นอัตราส่วนแปรผันตรงกับปริมาณตัวกลาง หากมีตัวกลางอยู่มากก็จะเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น หากแต่การเปลี่ยนแปลง pH ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะไม่ลดลงต่ำกว่า 3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลง pH นี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการดูดซับมลสารกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ก่อตัวบนพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ซึ่งจะเกิดการปลดปล่อยโปรตอน (H^+) ดังสมการ Surface Complexation Model



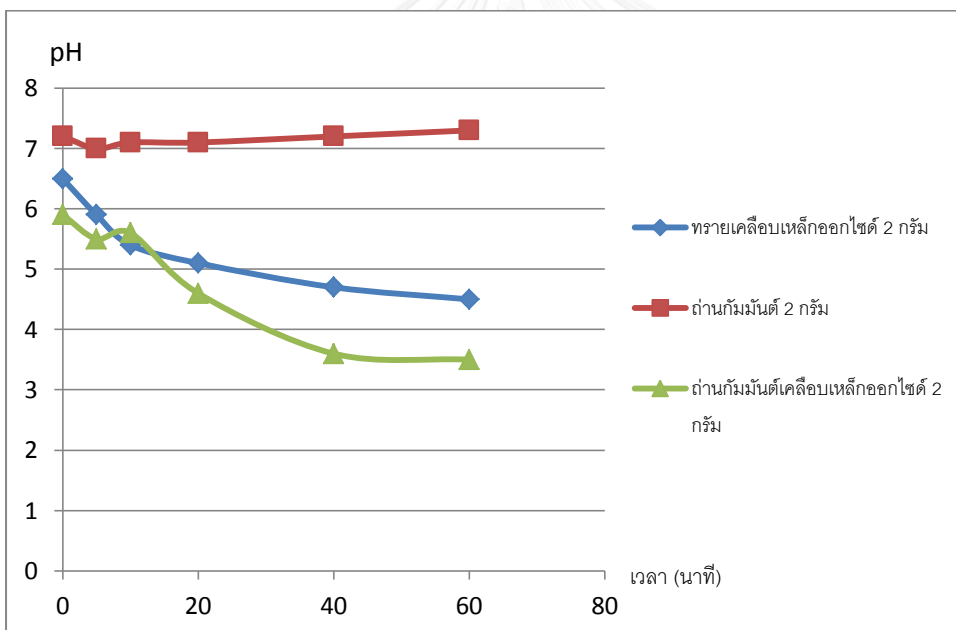
ซึ่งจากสมการจะเห็นว่าบางรูปแบบการเกาะติดของมลสารกับหมู่ไฮดรอกซิลที่สร้างขึ้นรอบๆ พื้นผิว เหล็กออกไซด์ที่อยู่ในน้ำนั้นจะมีการปลดปล่อยโปรตอน (H^+) ออกมาขณะที่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ยังคง เกาะติดอยู่กับพื้นผิวของโลหะและมลสาร ทำให้ค่าความเป็นกรดในน้ำสูงขึ้น

แม้ว่าความเป็นกรดน่าจะเป็นสมบัติที่ทำให้เหล็กออกไซด์ละลายน้ำออกมาเมื่อพิจารณาจาก Zeta Potential ของเหล็กที่สภาวะ pH แตกต่างกันซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ pH ต่ำกว่าหรือมากกว่า 6 แต่ เนื่องจากน้ำตัวอย่างที่เก็บได้เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีไม่มีสีสนิมอันเป็นลักษณะเฉพาะของเหล็ก ละลายน้ำ ประกอบกับปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวตัวกลางทรายและถ่านกัมมันต์มีอัตราส่วนที่ น้อยเมื่อเทียบกับมวลของตัวกลางทั้งหมด ทำให้สันนิษฐานว่าถ้าจะมีเหล็กละลายออกมาก็มีน้อยเมื่อ เทียบกับน้ำหนักของตัวกลางทั้งหมด

ส่วนถ่านกัมมันต์ธรรมดาที่ค่า pH สูงสุดจะขึ้นกับปริมาณตัวกลางในน้ำทิ้ง โดยปริมาณถ่านที่ 5 – 20 g/l จะไม่ทำให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อถ่านกัมมันต์มีปริมาณมากขึ้นขณะที่น้ำทิ้งใน Batch คงที่ค่า pH สูงสุดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่า pH ในตัวถ่านค่อนข้างสูง แต่เหตุที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ไม่มีพฤติกรรมของค่า pH ใน ลักษณะเดียวกันเป็นเพราะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ถูกยึดเกาะไปบางส่วนโดยเหล็กออกไซด์ซึ่งจะ เป็นตัวทำปฏิกิริยาหลักในการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในตัวถ่านแต่ละชนิด และแต่ละปริมาณนั้น เป็นไปดังที่แสดงในรูปที่ 4.19

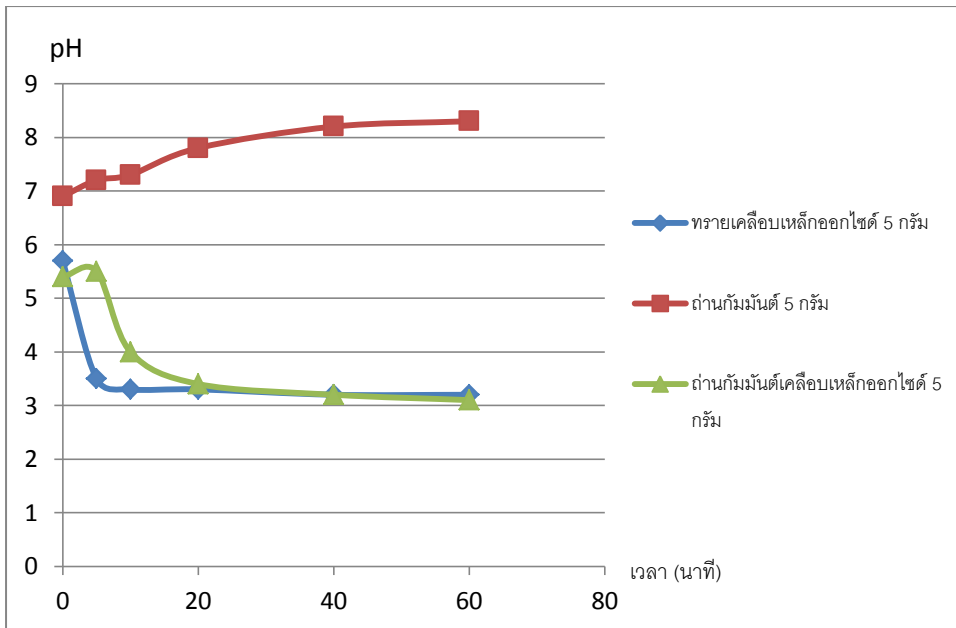


ก) ตัวกลางปริมาณ 5 g/l กวนผสม 60 นาที

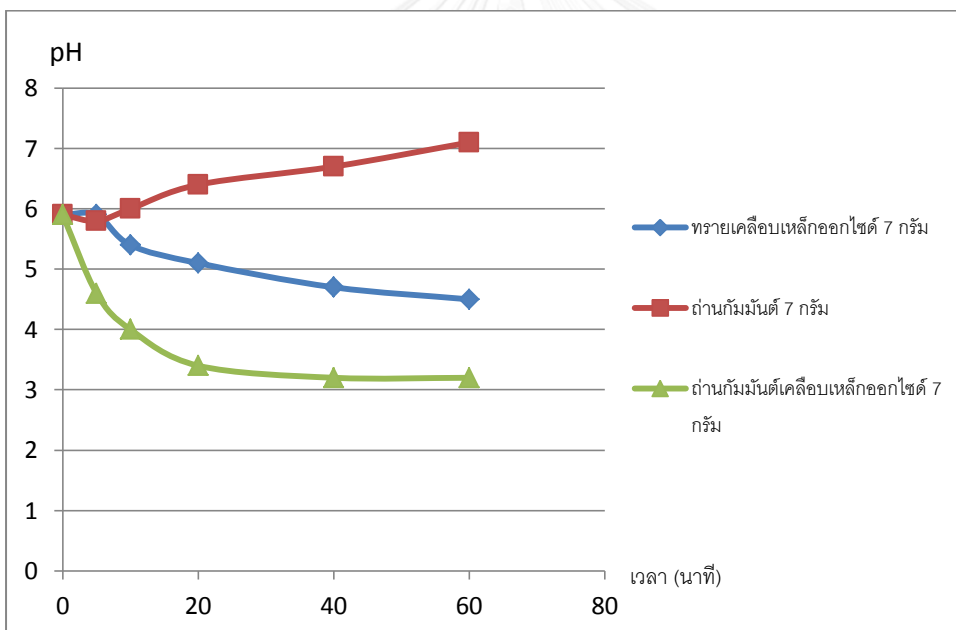


ข) ตัวกลางปริมาณ 20 g/l กวนผสม 60 นาที

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำทิ้งของตัวกลาง 3 ชนิด ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

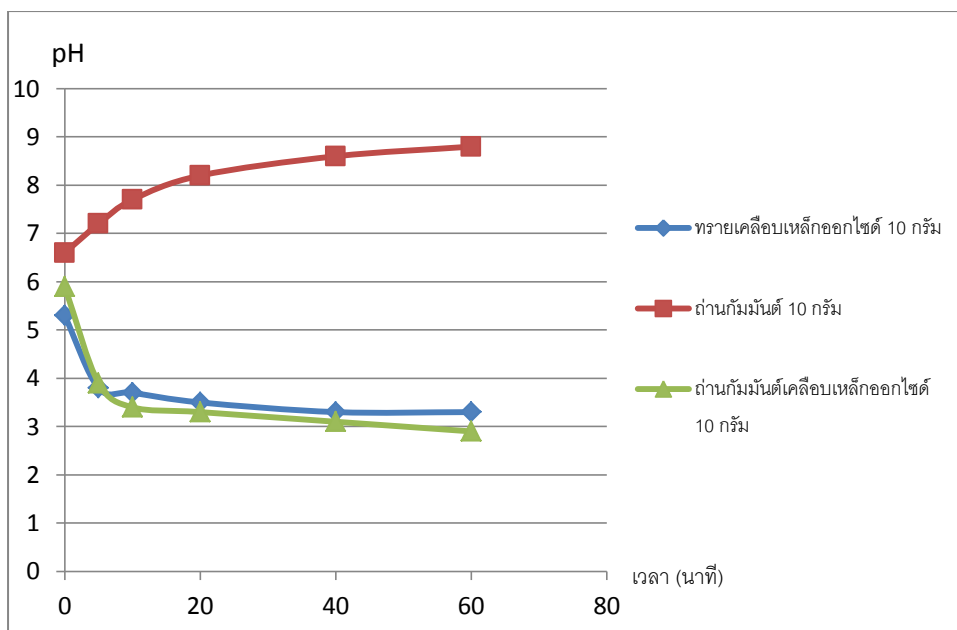


ค) ตัวกลางปริมาณ 50 g/l กวนผสม 60 นาที



ง) ตัวกลางปริมาณ 70 g/l กวนผสม 60 นาที

รูปที่ 4.19 (ต่อ) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำทิ้งของตัวกลาง 3 ชนิด ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

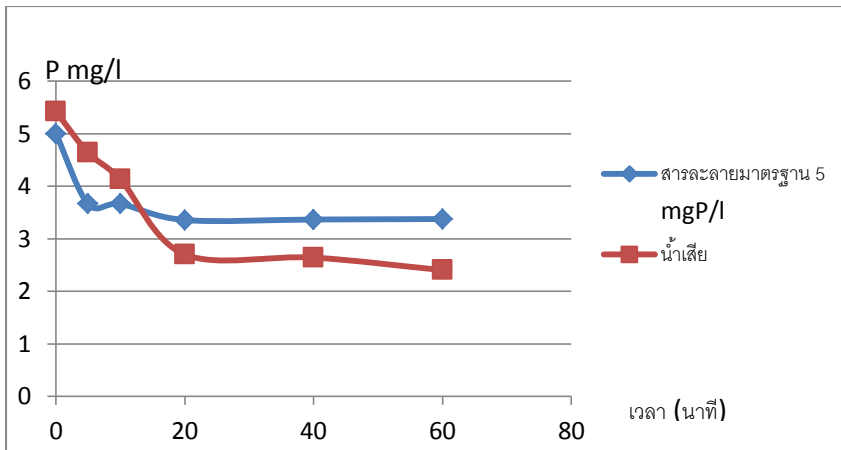


จ) ตัวกลางปริมาณ 100 g/l กวนผสม 60 นาที

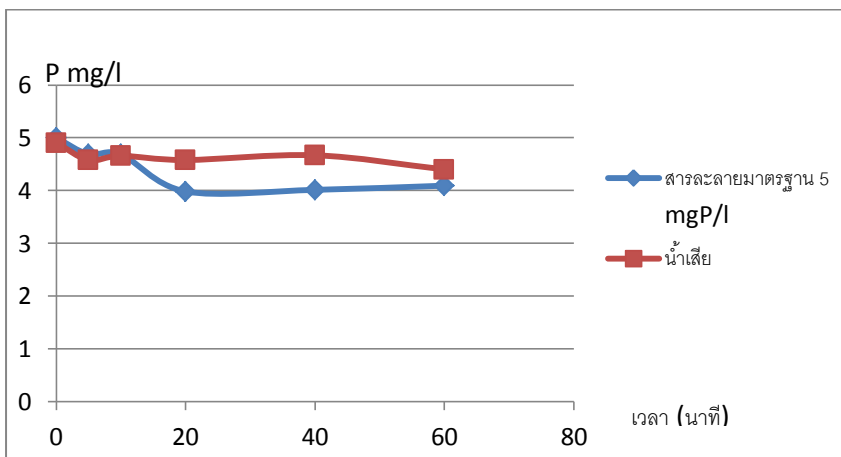
รูปที่ 4.19 (ต่อ) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำทิ้งของตัวกลาง 3 ชนิด ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

4.1.2 ง) เปรียบเทียบการดูดซับของตัวกลางความเข้มข้น 50 g/l ในน้ำเสียกับตัวกลางในสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

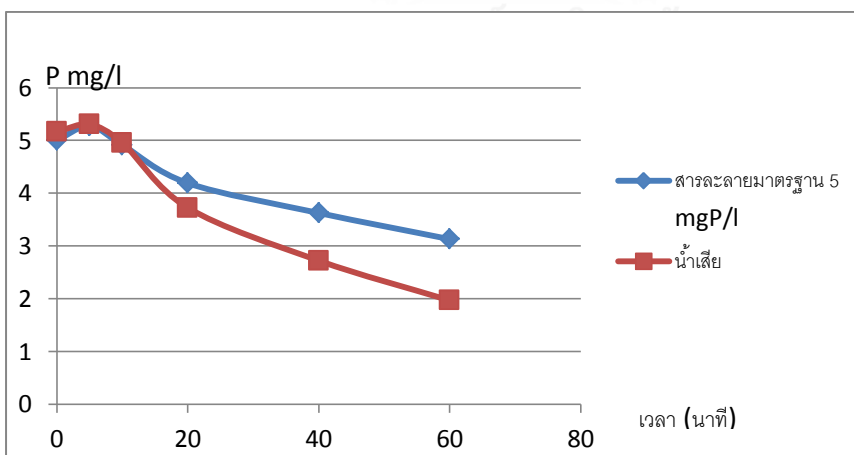
หัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองการดูดซับฟอสฟอรัสแบบ Batch ของตัวกลางแต่ละตัวในสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตกับน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อดูผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับการดูดซับฟอสฟอรัสจากองค์ประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำเสียจริง ซึ่งการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.20



ก) ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 50 g/l



ข) ตัวกลางถ่านกัมมันต์ 50 g/l



ค) ตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ 50 g/l

รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการทดลองการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตและน้ำเสีย โดยตัวกลางแต่ละชนิดในเวลา 60 นาที

ก) ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ข) ถ่านกัมมันต์

ค) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

จากกราฟเปรียบเทียบจะพบว่าลักษณะพฤติกรรมการดูดซับฟอสฟอรัสในสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ จะคล้ายคลึงกับการดูดซับน้ำทิ้ง โดยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ นั่นคือเข้าใกล้จุดสมดุลที่เวลา 20 นาทีของการกวนผสม แต่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่วัดได้จากน้ำทิ้งมีค่าน้อยกว่าที่วัดจากสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตอยู่ประมาณ 0.9 mg/l เมื่อถึงเวลา 60 นาที โดยอยู่ที่ 3.3 mg/l สำหรับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต และ 2.4 mg/l สำหรับน้ำทิ้ง

สำหรับถ่านกัมมันต์ธรรมชาติที่นำมาดูดซับน้ำที่นำมาทำการทดลองทั้งสองชนิดนั้น มีพฤติกรรมการดูดซับที่ใกล้เคียงกันกล่าวคือถึงจุดสมดุลในเวลาใกล้เคียงกันใน 20 นาที หากแต่สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตจะถูกดูดซับได้ดีกว่าฟอสฟอรัสที่ละลายในน้ำทิ้งที่นำมาทำการทดลอง ซึ่งความแตกต่างมีเพียง 0.3 mg/l ที่เวลา 60 นาที

ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ ความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสีย และสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตจะแตกต่างกันเล็กน้อย ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตลงไปที่ 3 mg/l ใน 60 นาที ขณะที่สามารถลดความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่นำมาทำการทดลองลงไปที่ 1.9 mg/l ภายใน 60 นาที ซึ่งส่วนต่างระหว่างสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตกับน้ำทิ้ง มีความคล้ายคลึงกับที่ทำการทดลองกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

4.2 ผลของเวลาการกักเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในชั้นคอลัมน์ตัวกลางที่ต่างกัน เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบเหล็กออกไซด์

การทดลองนี้จะใช้คอลัมน์จำนวน 4 คอลัมน์ต่ออนุกรมกันแล้วปล่อยให้ น้ำทิ้งไหลผ่านในอัตราการไหล 1 BV / hr (Bed Volume) โดย Bed Volume ในอัตราการไหลนี้คิดจากปริมาณตัวกลางที่ใส่ในคอลัมน์ทั้ง 4 รวมกัน ซึ่งมวลของตัวกลางในแต่ละคอลัมน์นั้นจะมีดังตาราง 4.4 ต่อไปนี้

ตาราง 4.4 มวลตัวกลางที่ใช้ในคอลัมน์แต่ละชั้นเพื่อให้ได้ความสูงของตัวกลางในคอลัมน์ 15 ซม.

คอลัมน์ ที่	ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์		ถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์	
	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักเหล็ก ออกไซด์	น้ำหนัก (g)	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักเหล็ก ออกไซด์
1	85.65	3.17	42.2	45.64	4.93
2	85.02	3.15	41.64	45.54	4.92
3	85.5	3.16	37.7	45.69	4.93
4	85.07	3.15	38.98	45.53	4.92

จากการคำนวณจะพบว่าแต่ละคอลัมน์จะมีปริมาตรของตัวกลางเท่ากับ 62.32 cm^3 หรือ 0.062 ลิตร และค่า Bed Volume ของทุกคอลัมน์รวมกันคือ 0.25 ลิตร และจากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นการบรรจุ (packing density) เฉลี่ยของตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสูงที่สุดที่ 1375.97 g/l ค่าความหนาแน่นของตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ 735.48 g/l และความหนาแน่นของตัวกลางถ่านกัมมันต์ที่ 647.26 g/l

4.2.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของฟอสฟอรัสกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้ในแต่ละชั้นคอลัมน์ เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ความสูงของชั้นตัวกลางที่แตกต่างกันขณะที่อัตราการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลางคงที่ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่า Hydraulic Retention Time ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$HRT = \frac{\text{Volume of aeration tank}}{\text{influent flowrate}} \quad (4.7)$$

เนื่องจากอัตราการไหลที่ใช้คือ 1 Bed Volume /hr โดยที่ Bed Volume คำนวณจากปริมาณตัวกลางทั้ง 4 ชั้นที่ต่ออนุกรมรวมกันดังที่แสดงไปในรูปที่ 3.2 หรือก็คือ 249 ml ดังนั้นจะสามารถหา HRT ของคอลัมน์แต่ละชั้นได้ดังนี้ โดยนับจากชั้นบนลงล่าง

$$\text{คอลัมน์ตัวกลางชั้นที่ 1} = \frac{0.25 \text{ BV}}{1 \text{ BV/hr}} \text{ เท่ากับ HRT 15 นาที}$$

$$\text{คอลัมน์ตัวกลางชั้นที่ 2} = \frac{0.50 \text{ BV}}{1 \text{ BV/hr}} \text{ เท่ากับ HRT 30 นาที}$$

$$\text{คอลัมน์ตัวกลางชั้นที่ 3} = \frac{0.75 \text{ BV}}{1 \text{ BV/hr}} \text{ เท่ากับ HRT 45 นาที}$$

$$\text{คอลัมน์ตัวกลางชั้นที่ 4} = \frac{1.00 \text{ BV}}{1 \text{ BV/hr}} \text{ เท่ากับ HRT 60 นาที}$$

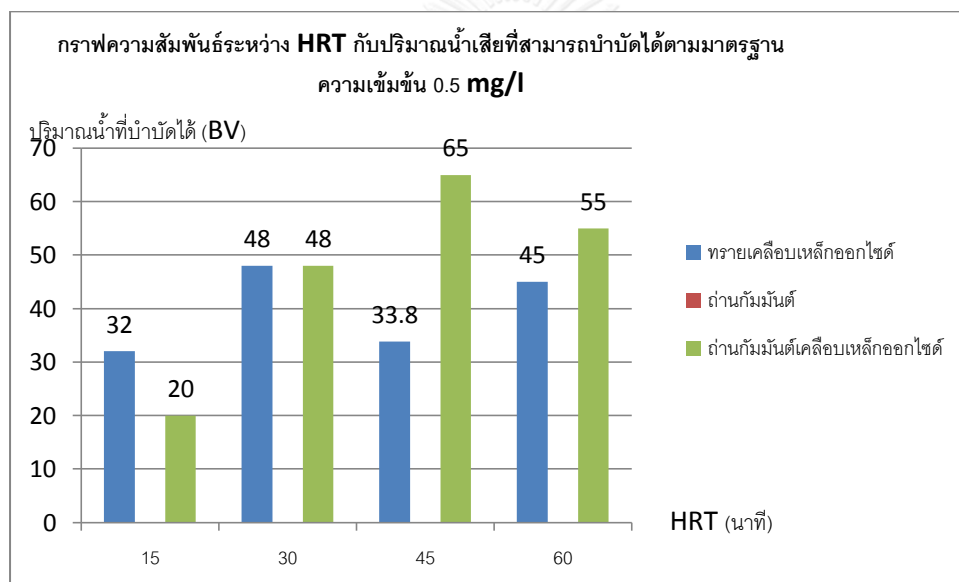
จากผลการทดลองที่ได้ สำหรับ HRT ที่ 15 นาทีที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ในการบำบัดฟอสฟอรัส โดยจะอยู่ที่ 32 BV ก่อนจะถึงจุดไหลทะลุที่ 0.5 mg/l และ 1.0 mg/l เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพเพียง 20 BV

ที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ HRT 30 นาทีนั้นจะเป็นจุดที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดฟอสฟอรัสเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่เก็บน้ำช่วงอื่นๆ โดยจะบำบัดน้ำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 0.5 mg/l ได้ 48 BV และเกณฑ์มาตรฐาน 1.0 mg/l ได้ 56 BV ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นั้นปริมาณน้ำที่บำบัดให้อยู่ในมาตรฐานได้จะเพิ่มขึ้นจาก HRT 15 นาทีโดยอยู่ที่ 48 BV สำหรับมาตรฐานฟอสฟอรัสละลายน้ำ 0.5 mg/l และ 64 BV ที่มาตรฐานฟอสฟอรัส 1 mg/l ตามลำดับ

สำหรับ HRT 45 นาที ประสิทธิภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการบำบัดจะลดลงจาก HRT 30 นาที โดยจะอยู่ที่ 33.8 BV สำหรับมาตรฐานความเข้มข้นฟอสฟอรัส 0.5 mg/l และ 39 BV ที่

มาตรฐานความเข้มข้น 1.0 mg/l ส่วนในกรณีของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นั้น ที่ระยะเวลา กักเก็บ 45 นาทีนี้คือจุดที่ตัวกลางมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด โดยจะบำบัดน้ำให้ฟอสฟอรัสละลาย น้ำอยู่ในมาตรฐาน 0.5 mg/l ได้ถึง 65 BV และมาตรฐานฟอสฟอรัสละลายน้ำ 1.0 mg/l ได้ 71.5 BV ตามลำดับ

ที่ HRT 60 นาที ประสิทธิภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะเพิ่มขึ้นมาอีกครั้ง แต่ยังคงต่ำกว่า ประสิทธิภาพสูงสุดที่วัดได้ที่ HRT 30 นาทีอยู่เล็กน้อย โดยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำ เสียให้อยู่ในมาตรฐาน 0.5 mg/l จะทำได้ 45 BV และมาตรฐาน 1.0 mg/l ได้ 50 BV ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะลดลงจากค่าสูงสุดที่ HRT 45 นาที โดย จะอยู่ที่ 55 BV สำหรับมาตรฐาน 0.5 mg/l และ 65 BV สำหรับมาตรฐาน 1.0 mg/l ตามลำดับ

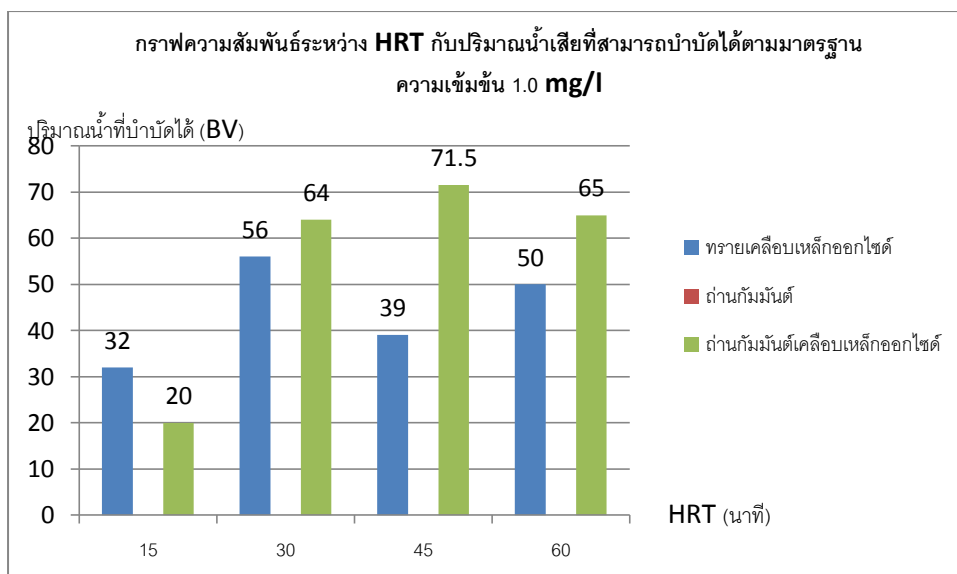


ก) เกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นฟอสฟอรัส 0.5 mg/l

รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสให้เหลือความเข้มข้นตามมาตรฐานได้

ก) เกณฑ์มาตรฐาน 0.5 mg/l

ข) เกณฑ์มาตรฐาน 1 mg/l



ข) เกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นฟอสฟอรัส 1 mg/l

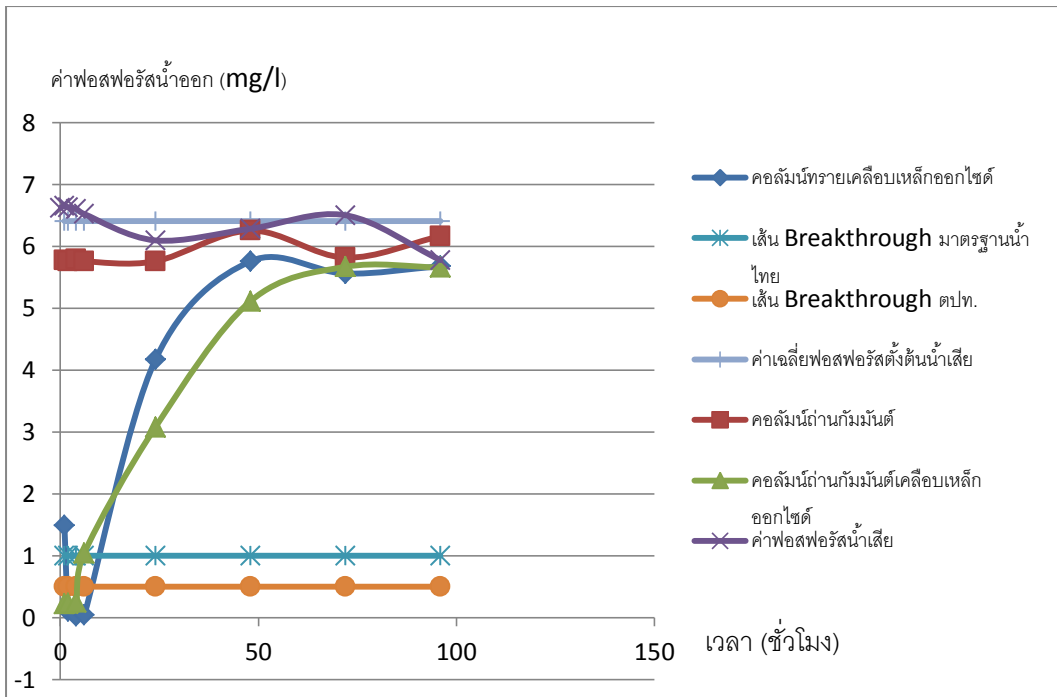
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสให้เหลือความเข้มข้นตามมาตรฐานได้

ข) เกณฑ์มาตรฐาน 0.5 mg/l

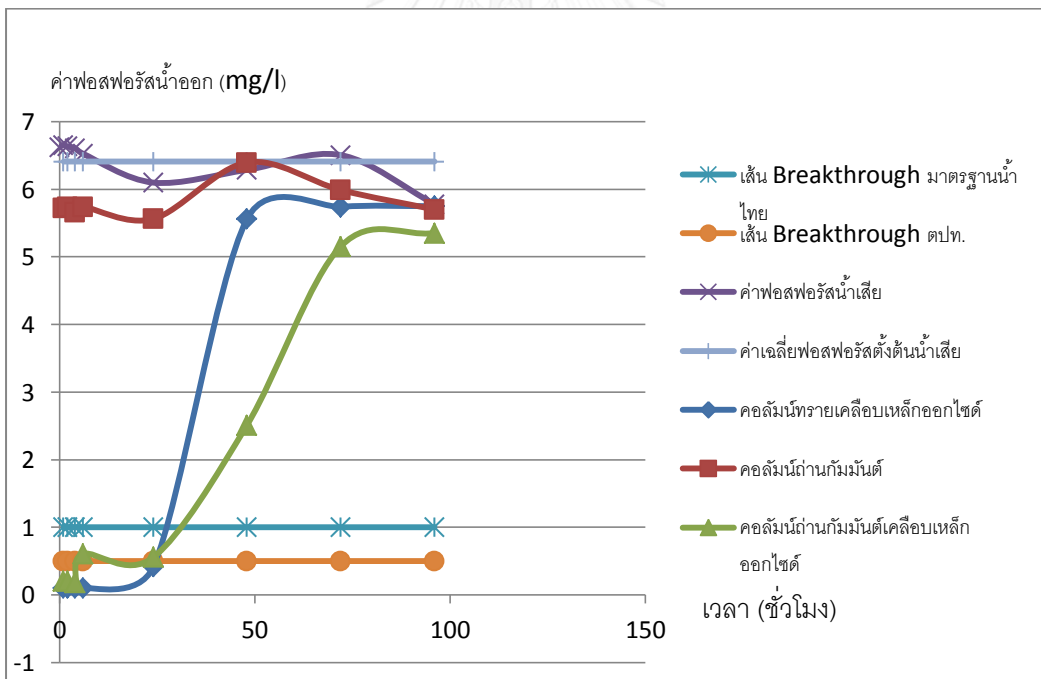
ข) เกณฑ์มาตรฐาน 1 mg/l

เมื่อดูกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ตามมาตรฐานตามรูปที่ 4.2.0 จะพบว่าที่ระยะเวลา HRT 30 นาที ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำได้ปริมาณมากที่สุดคือ 56 BV สำหรับเกณฑ์มาตรฐานฟอสฟอรัส 1 mg/l และ 48 BV สำหรับเกณฑ์มาตรฐานฟอสฟอรัส 0.5 mg/l ก่อนจะถึงจุดไหลทะลุ ขณะที่ระยะเวลา HRT 60 นาทีนั้นจะบำบัดได้รองลงมาที่ 50 BV และ 45 BV ก่อนจะไหลทะลุ ทำให้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้คอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์บำบัดฟอสฟอรัสจะอยู่ที่ 30 นาที

สำหรับถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นั้น ระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดจะอยู่ที่ 45 นาทีโดยสามารถบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำได้ 65 BV สำหรับค่ามาตรฐาน 0.5 mg/l และ 71.5 BV สำหรับค่ามาตรฐาน 1 mg/l ตามลำดับ



ก) HRT 15 นาที



ข) HRT 30 นาที

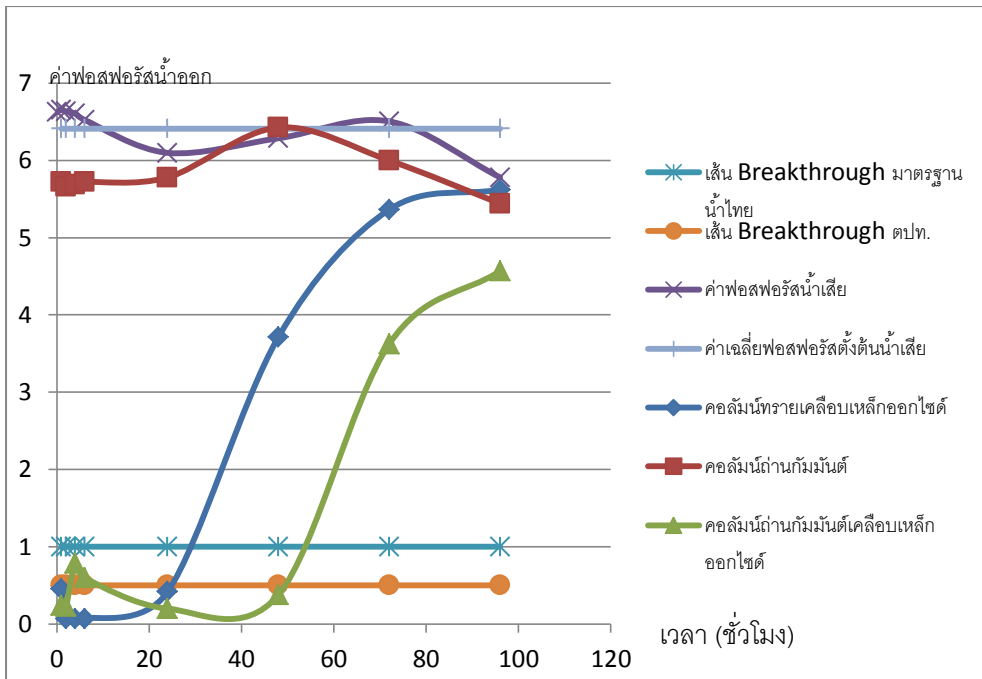
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลลิมน์สามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกันกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน

ก) HRT 15 นาที

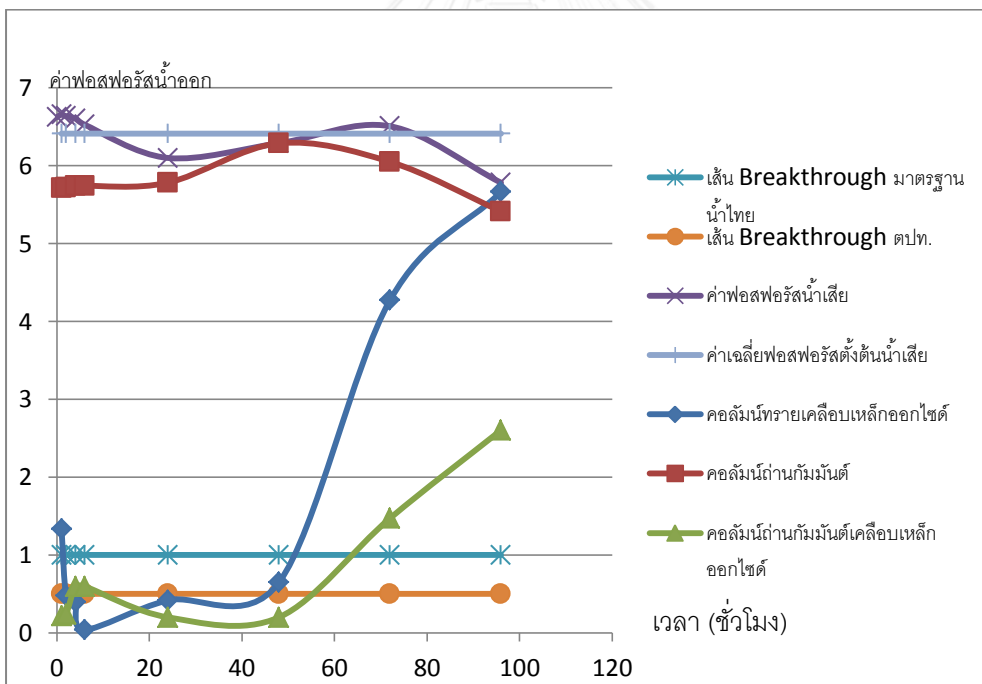
ข) HRT 30 นาที

ค) HRT 45 นาที

ง) HRT 60 นาที



ค) HRT 45 นาที



ง) HRT 60 นาที

รูปที่ 4.22 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลัมน์สามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกัน

ก) HRT 15 นาที

ข) HRT 30 นาที

ค) HRT 45 นาที

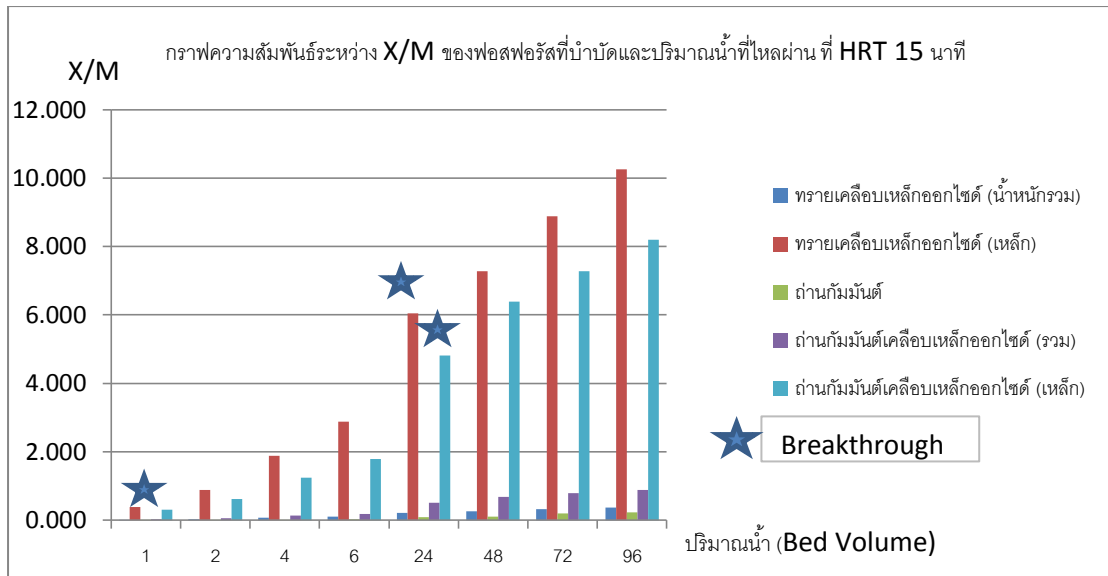
ง) HRT 60 นาที

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนมวลของฟอสฟอรัสที่ดูดซับได้ต่อมวลของตัวกลางจะพบว่าที่จุด Breakthrough HRT 15 นาทีนั้นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ 0.224 mgP/g หรือ 6.052 mgP/g หากคิดบนพื้นฐานที่ว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวอยู่คือตัวทำปฏิกิริยา ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับได้ที่ 0.520 mgP/g หรือ 4.818 mgP/g หากพิจารณาเฉพาะเหล็กออกไซด์บนพื้นผิว

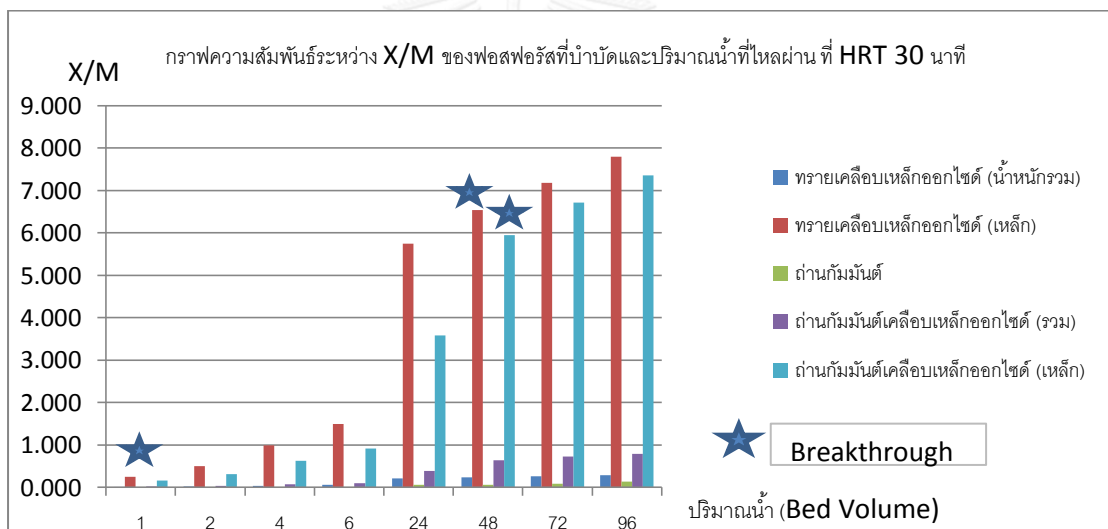
เมื่อเพิ่มระยะเวลา HRT เป็น 30 นาที ที่จุด Breakthrough นั้นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ 0.242 mgP/g หรือ 6.544 mgP/g หากคิดบนพื้นฐานที่ว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวอยู่คือตัวทำปฏิกิริยา ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับได้ที่ 0.643 mgP/g หรือ 5.950 mgP/g หากพิจารณาเฉพาะเหล็กออกไซด์บนพื้นผิว

เมื่อพิจารณาระยะเวลา HRT ที่ 45 นาที ที่จุด Breakthrough นั้นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ 0.204 mgP/g หรือ 5.522 mgP/g หากคิดบนพื้นฐานที่ว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวอยู่คือตัวทำปฏิกิริยา ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับได้ที่ 0.652 mgP/g หรือ 6.042 mgP/g หากพิจารณาเฉพาะเหล็กออกไซด์บนพื้นผิว

ระยะเวลา HRT ที่ 60 นาที ที่จุด Breakthrough ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ 0.243 mgP/g หรือ 6.572 mgP/g หากคิดบนพื้นฐานที่ว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวอยู่คือตัวทำปฏิกิริยา ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดซับได้ที่ 0.691 mgP/g หรือ 6.401 mgP/g หากพิจารณาเฉพาะเหล็กออกไซด์บนพื้นผิว

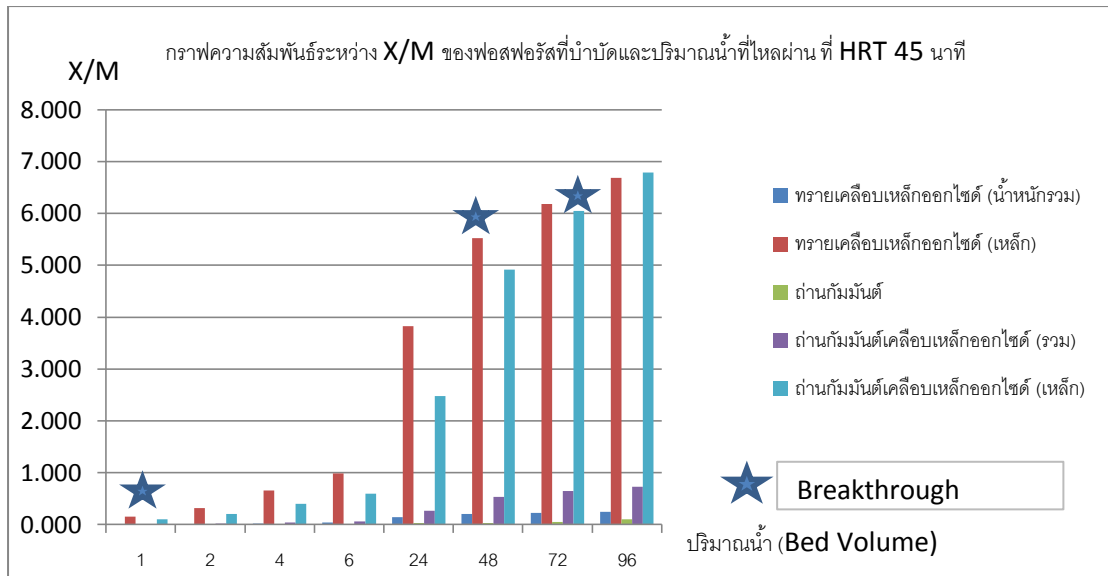


ก) HRT 15 นาที

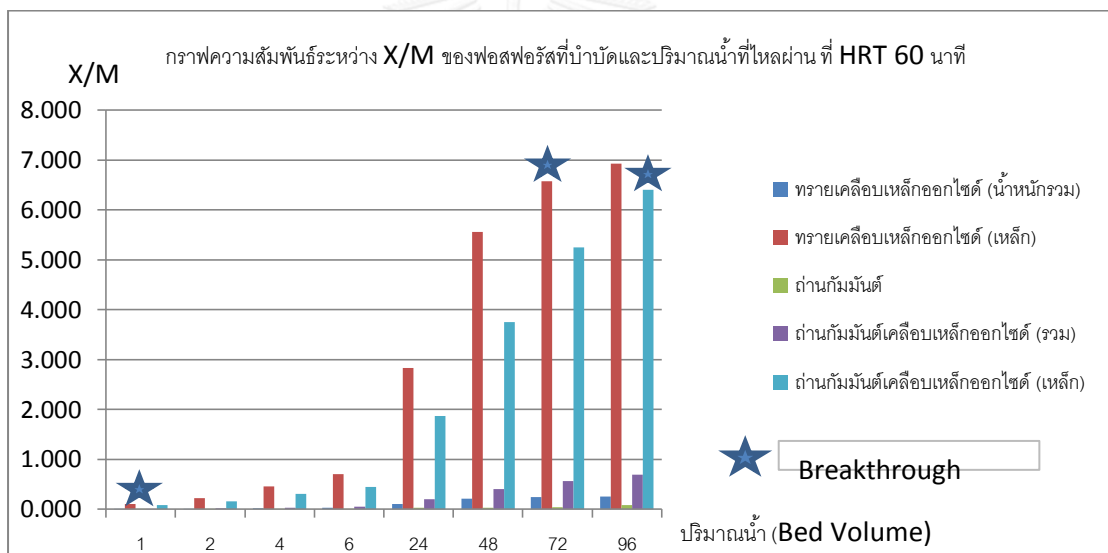


ข) HRT 30 นาที

รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนมวลของฟอสฟอรัสที่ถูกบำบัดต่อมวลของตัวกลางที่ HRT ต่างๆ กัน ก) HRT 15 นาที ข) HRT 30 นาที ค) HRT 45 นาที ง) HRT 60 นาที



ค) HRT 45 นาที



ง) HRT 60 นาที

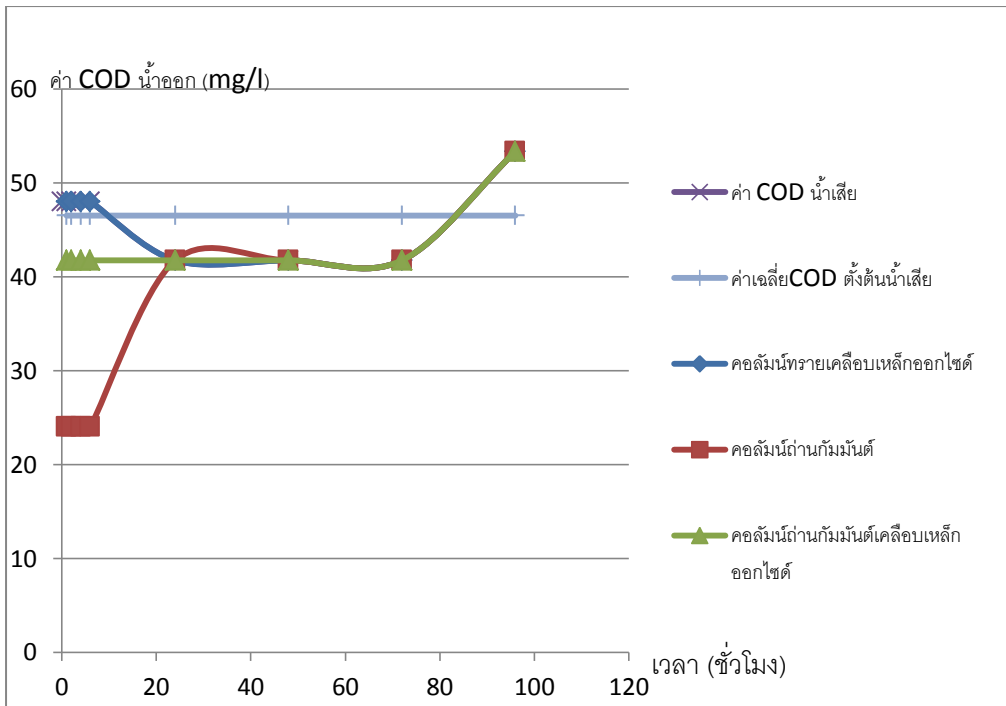
รูปที่ 4.23 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนมวลของฟอสฟอรัสที่ถูกบำบัดต่อมวลของตัวกลางที่ HRT ต่างๆ กัน ก) HRT 15 นาที ข) HRT 30 นาที ค) HRT 45 นาที ง) HRT 60 นาที

4.2.2 การเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของค่า COD ระหว่างการบำบัดน้ำทิ้งโดยใช้คอลัมน์ตัวกลาง จากกราฟในรูปที่ 4.2.3 เราจะสามารถสรุปได้ว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่สามารถบำบัด COD ได้เลยไม่ว่าจะใช้เวลากักเก็บ 15, 30, 45 หรือ 60 นาที

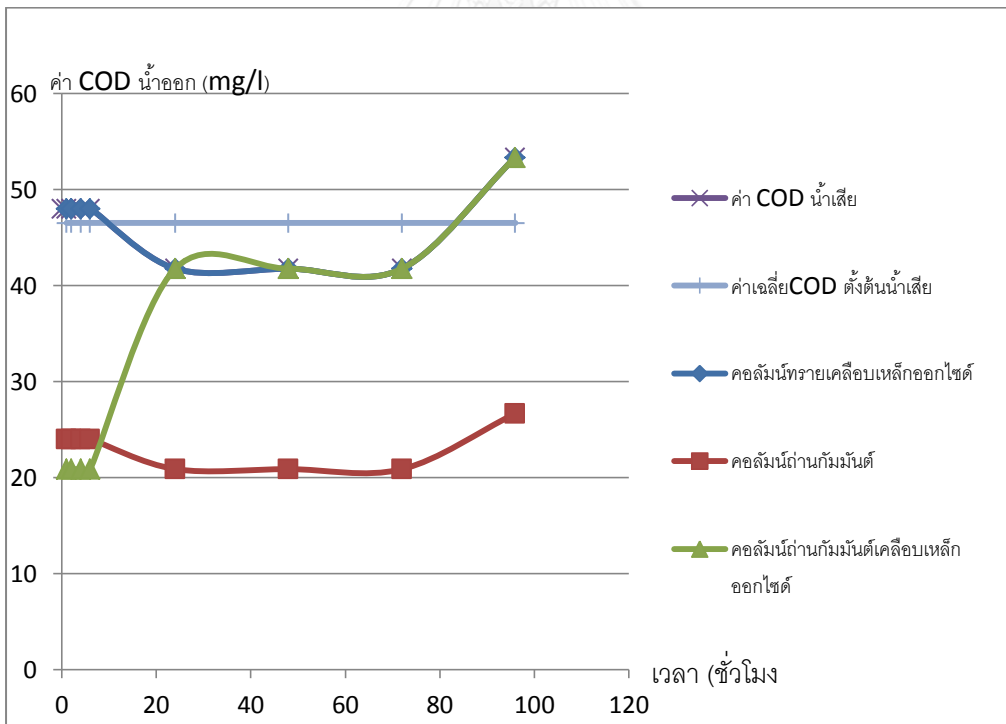
สำหรับถ่านกัมมันต์นั้น ที่ค่า HRT 15 นาที หรือก็คือคอลัมน์ชั้นที่ 1 สามารถบำบัด COD ได้ด้วย ประสิทธิภาพ 50% เป็นปริมาณเพียง 8 BV เท่านั้นก่อนที่จะไม่สามารถบำบัดได้อีก ขณะที่ค่า HRT 30 นาทีหรือคอลัมน์ที่สองซึ่งมีความสูงรวม 50 cm นั้นสามารถบำบัด COD ได้ที่ประสิทธิภาพ 50% ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองโดยไม่มีการลดประสิทธิภาพ ซึ่งยังผลทำให้คอลัมน์ 3 และ 4 ที่ต่อเนื่องกันนั้นมีค่า COD ที่ลดลงไปจากน้ำเสีย 50% เช่นกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่า HRT ที่ 30 นาทีที่เหมาะสมสำหรับการบำบัด COD โดยถ่านกัมมันต์

ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่ HRT 15 นาทีหรือความสูงคอลัมน์ 25 ซม. สามารถบำบัด COD จากน้ำได้มีประสิทธิภาพ 20% เป็นปริมาณเพียง 24 BV เท่านั้นก่อนที่จะไม่สามารถบำบัดได้อีก ขณะที่คอลัมน์ชั้นที่ 2 หรือ HRT 30 นาที ที่ความสูงคอลัมน์ 50 ซม. จะมีประสิทธิภาพการบำบัด COD ที่ประมาณ 50% เป็นระยะเวลาเท่ากับคอลัมน์ชั้นแรก เช่นเดียวคอลัมน์ชั้น 3 หรือความสูงรวม 75 ซม. และ HRT 45 นาที ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการบำบัด COD ได้ 50% เพิ่มขึ้นมาที่ 48 BV ต่อเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บเป็น 60 นาที หรือความสูงคอลัมน์ 100 ซม. เท่านั้น ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ธรรมดา

สำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นไม่มีประสิทธิภาพใดๆ ในการบำบัด COD ไม่ว่าจะที่ HRT และความสูงทุกชนิดที่ทำการทดลอง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าสมบัติการบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำนั้นเป็นสมบัติของถ่านกัมมันต์



ก) HRT 15 นาที



ข) HRT 30 นาที

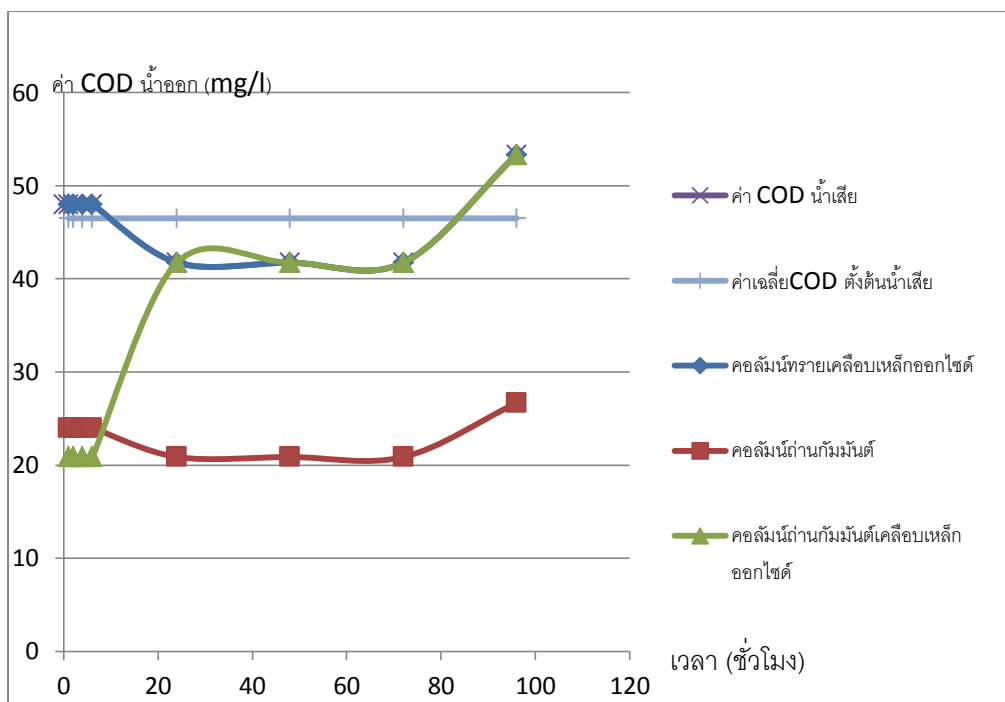
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่า COD กับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลัมน์สามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกัน

ก) HRT 15 นาที

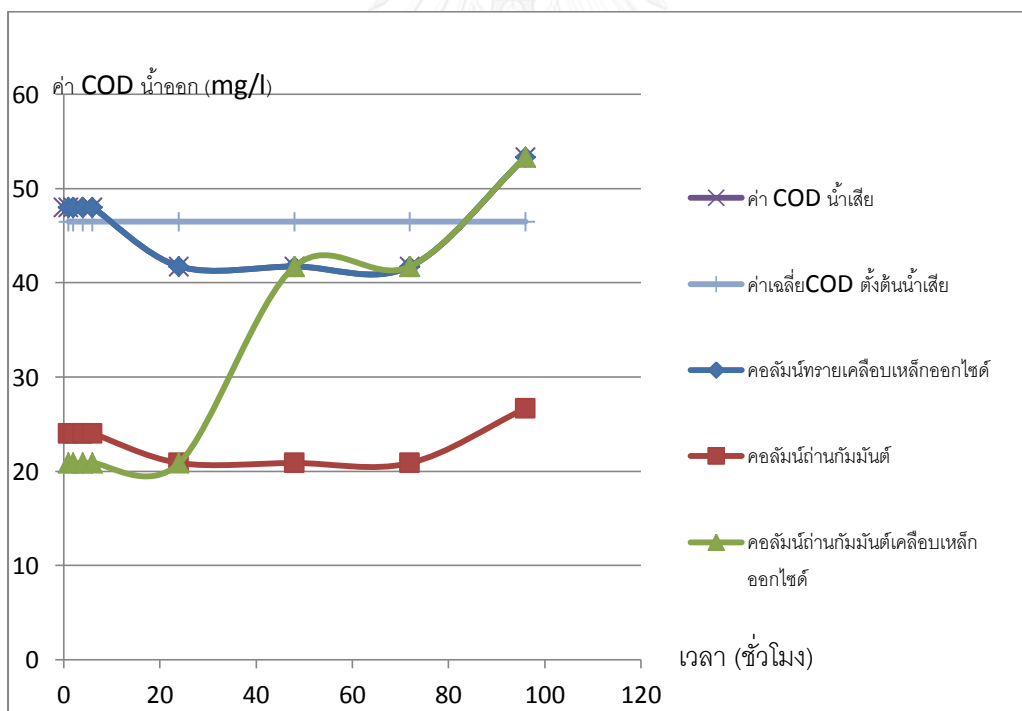
ข) HRT 30 นาที

ค) HRT 45 นาที

ง) HRT 60 นาที



ค) HRT 45 นาที



ง) HRT 60 นาที

รูปที่ 4.24 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบค่า COD กับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลัมน์สามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกัน

ก) HRT 15 นาที

ข) HRT 30 นาที

ค) HRT 45 นาที

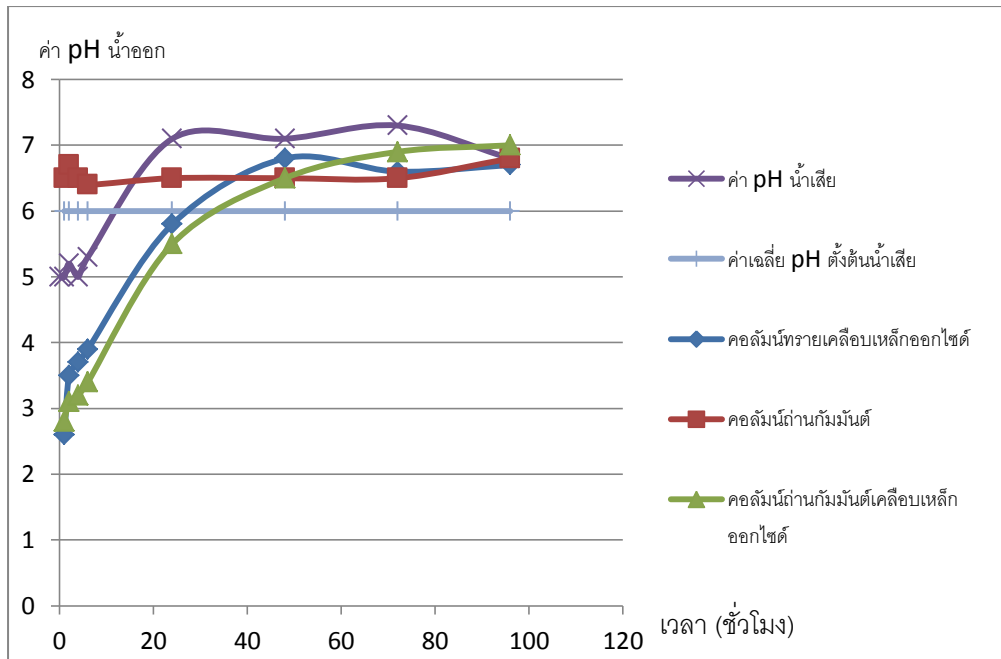
ง) HRT 60 นาที

4.2.3 การเปรียบเทียบค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ตัวกลาง

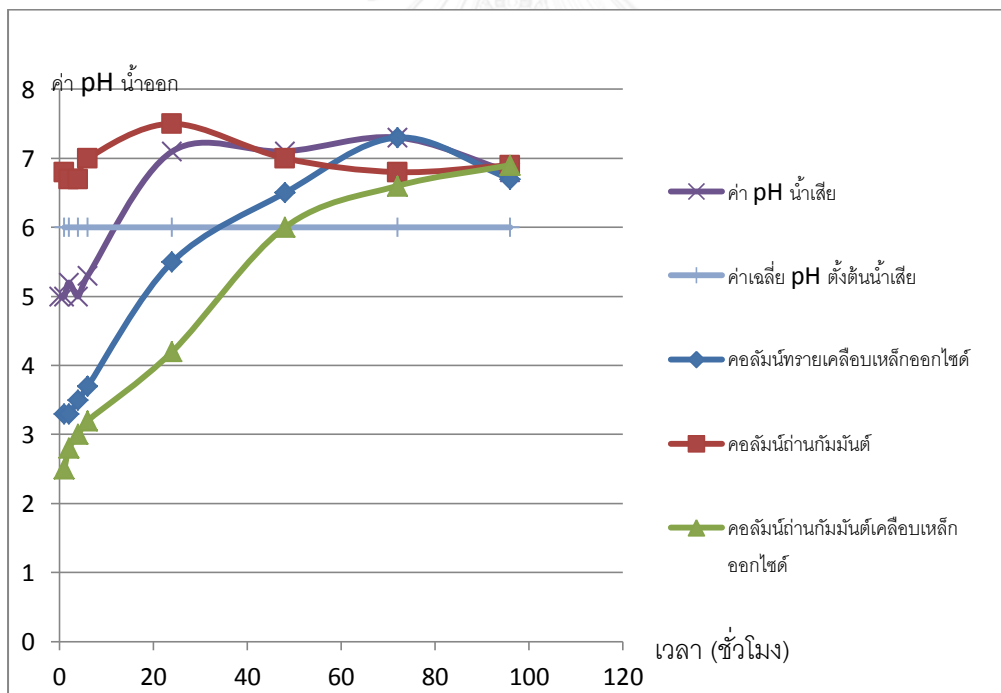
โดยพื้นฐานทั่วไป การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเดียวกับผลที่วัดได้ในการทดลอง 4.1.2 ค) นั่นคือถ่านกัมมันต์จะทำให้ค่า pH สูงขึ้นจากเดิม แต่ก็เป็นเฉพาะในคอลัมน์ที่ 2, 3 และ 4 เท่านั้น ขณะที่คอลัมน์ที่ 1 นั้นมีแนวโน้มคงที่หรือน้อยกว่าน้ำเสียที่เข้าระบบ ซึ่งทำให้สันนิษฐานได้ว่าเวลากักเก็บน้ำเพียง 15 นาที น้อยเกินกว่าจะส่งผลกับค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่คอลัมน์ที่ 2, 3 และ 4 ค่า pH จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากค่าของน้ำเสียตั้งต้นก่อนจะลดลงมาใกล้เคียงกับน้ำที่เข้าระบบเมื่อบำบัดไปได้ประมาณ 48 BV ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกราฟการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของถ่านกัมมันต์กับกราฟการเปลี่ยนแปลงค่า COD และกราฟการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสแล้วจะพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันชัดเจน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ผ่านชั้นคอลัมน์ถ่านกัมมันต์จึงมิได้เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับ COD และฟอสฟอรัส แต่น่าจะเกิดจากสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่นำมาทดลองดังที่ได้วิเคราะห์ในหัวข้อ 4.1.2 ค)

สำหรับคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นจะลดค่า pH น้ำออกลงไปที่ประมาณ 2.7 ก่อนที่ค่า pH จะเพิ่มขึ้นจนกลับมาเท่ากับค่าน้ำเสียเริ่มต้น ซึ่งพฤติกรรมการเพิ่มค่า pH กลับไปสู่จุดตั้งต้นนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟแสดงพฤติกรรมกำจัดฟอสฟอรัสด้วยคอลัมน์ตัวกลางในรูปที่ 4.2.1 บ่งชี้ว่าการดูดซับฟอสฟอรัสของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นมีความสัมพันธ์กับค่า pH ที่ลดลง ซึ่งทั้งหมดเกิดจากลักษณะปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสหรือมลสารโดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ก่อตัวขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ดังที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อ 4.1.2 ค) และการที่ค่า pH สูงขึ้นในช่วงหลังนั้นจะมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสที่ถึงจุดอิ่มตัว เพราะตัวกลางไม่สามารถดูดซับฟอสฟอรัสเพิ่มได้อีกต่อไป ปฏิกิริยาการดูดซับโดยหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งก่อให้เกิด H^+ จึงหยุดลง

คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก็แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำที่ไหลออกในลักษณะเดียวกับคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ คือค่าจะต่ำเมื่อยังเกิดปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ และค่า pH จะกลับสู่ปกติเมื่อตัวกลางเริ่มไม่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งได้อีก ดังรูปที่ 4.2.4 ซึ่งก็สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการเดียวกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เนื่องจากพื้นผิวเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ซึ่งมีปฏิกิริยาไม่แตกต่างกัน และจากการเปรียบเทียบกับกราฟการเปลี่ยนแปลงค่า COD จะพบว่าการดูดซับ COD มีอิทธิพลน้อยมากกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เมื่อเทียบกับอิทธิพลจากการดูดซับฟอสฟอรัส



ก) HRT 15 นาที



ข) HRT 30 นาที

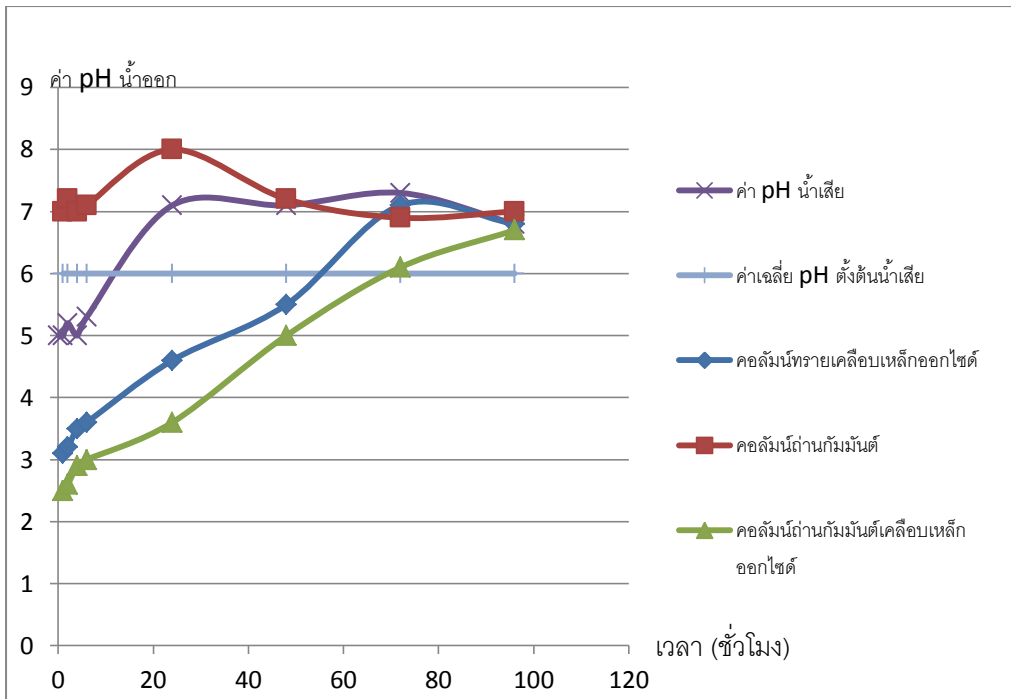
รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบค่า pH กับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลลิม์นัสามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกัน

ก) HRT 15 นาที

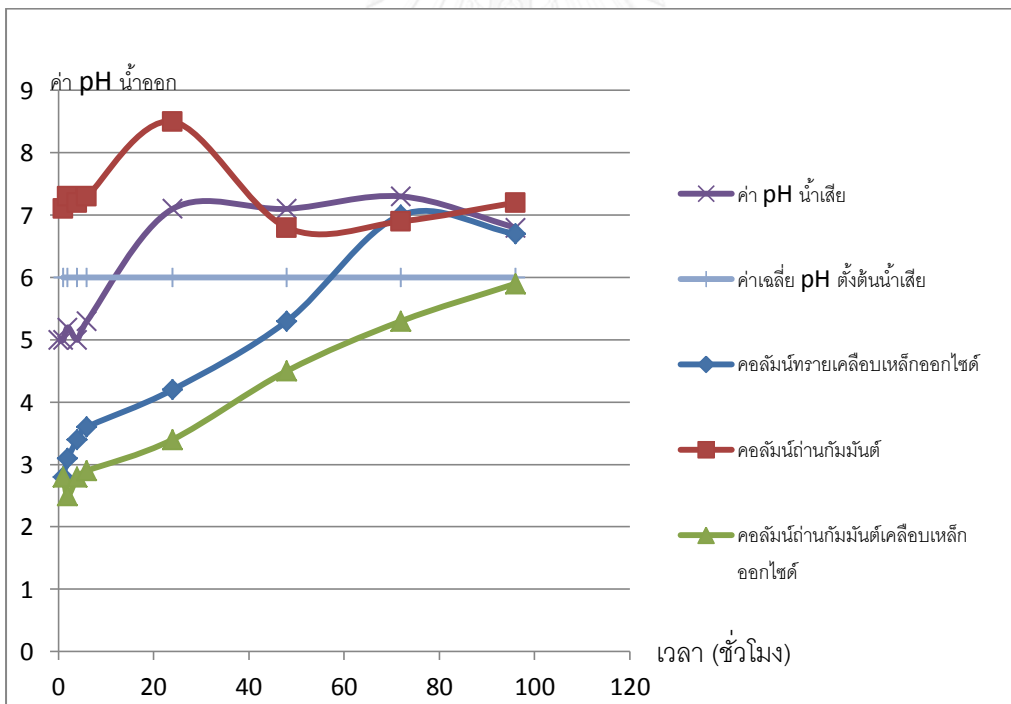
ข) HRT 30 นาที

ค) HRT 45 นาที

ง) HRT 60 นาที



ค) HRT 45 นาที



ง) HRT 60 นาที

รูปที่ 4.25 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบค่า pH กับปริมาณน้ำที่แต่ละคอลลิมน์สามารถบำบัดได้โดยตัวกลางต่างชนิดกัน

ก) HRT 15 นาที

ข) HRT 30 นาที

ค) HRT 45 นาที

ง) HRT 60 นาที

4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวดักกลางทั้งสามชนิด ก่อนใช้งานและหลังใช้งานด้วย SEM / EDX

การทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์พื้นผิวดักกลางในการดูดซับทั้งสามชนิดเพื่อตรวจสอบธาตุต่างๆ บนพื้นผิวดักกลางและคุณลักษณะของพื้นผิวในสองกรณีได้แก่ตัวกลางก่อนการใช้งาน และตัวกลางที่ผ่านการใช้งานดูดซับมลสารในน้ำเสียที่นำมาทดลองจนถึงจุด Breakthrough

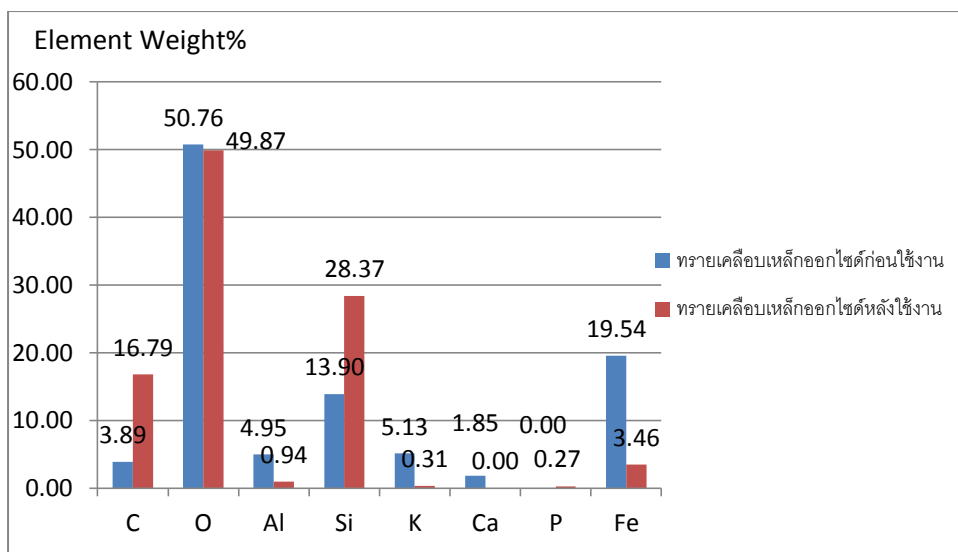
4.3.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวดักกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการใช้งานและหลังการใช้งาน

จากการวิเคราะห์พื้นผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนมวลของธาตุต่างๆ บนพื้นผิวโดยตรวจสอบก่อนการใช้งาน 3 ตัวอย่าง และหลังการใช้งานถึงจุด Breakthrough 3 ตัวอย่าง ธาตุที่พบบนพื้นผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งก่อนและหลังการใช้งานมากที่สุดจะได้แก่ออกซิเจน (O) โดยมีค่าเฉลี่ยก่อนการใช้งานและหลังการใช้งานโดยประมาณ 50% ซึ่งเป็นธาตุที่ตรวจพบมากที่สุดบนพื้นผิว

ขณะที่ซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของทรายนั้นตรวจพบอัตราส่วนมวลโดยเฉลี่ย 13.9% ก่อนการใช้งาน และ 28.37% หลังการใช้งาน ขณะที่เหล็ก (Fe) สามารถตรวจพบโดยเฉลี่ย 19.54% ก่อนการใช้งานและ 3.46% หลังการใช้งาน ซึ่งการที่สามารถตรวจพบซิลิคอนจากการสแกนพื้นผิวทำให้สามารถอนุมานได้ว่าการเคลือบพื้นผิวด้วยเหล็กออกไซด์นั้นไม่อาจกระทำได้อย่างทั่วถึง หรือเหล็กออกไซด์ไม่สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวของตัวกลางได้ดีนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการชั่งน้ำหนักตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 และสำหรับเหตุผลที่เหล็กออกไซด์ลดลงหลังจากการใช้งานคือเหล็กออกไซด์ในสถานะ pH ลดลงต่ำกว่า 3 จะเปลี่ยนจาก Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} แล้วละลายออกจากพื้นผิวดักกลาง ซึ่งจากการเปรียบเทียบอ้างอิงกับการทบทวนเอกสารของ M. Edward และ M. Benjamin แล้วจะพบว่าเหล็กไฮดรอกไซด์ (Fe^{3+}) ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จะมีการละลายออกจากพื้นผิวดักกลางที่ค่า pH ต่ำกว่า 2 หากแต่ไม่สามารถอ้างอิงได้ว่าละลายออกมาเป็นปริมาณเท่าใดเนื่องจากการทดลองในงานวิจัยดังกล่าวใช้เวลาจำกัดเพียง 30 นาที ขณะที่การทดลองนี้ใช้เวลา 4 วัน

สำหรับธาตุอื่นๆ ที่ตรวจพบบนพื้นผิวดักกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ได้แก่คาร์บอน (C) ที่มีค่าเฉลี่ยมวล 3.89% ก่อนการใช้งานและ 16.79% หลังการใช้งาน โพแทสเซียม (K) ตรวจพบโดยเฉลี่ย 5.12% ก่อนการใช้งานและ 0.31% หลังการใช้งาน อลูมิเนียม (Al) นั้นตรวจพบโดยเฉลี่ย 4.95% ก่อนการใช้งาน และ 0.94% หลังการใช้งาน

มีเพียงฟอสฟอรัส (P) เท่านั้นที่จะตรวจไม่พบบนพื้นผิวดักกลางก่อนการใช้งานและเพิ่มขึ้นมาเพียงเล็กน้อยโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.27% หลังการใช้งานแล้ว ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กออกไซด์ที่ปรากฏบนพื้นผิวดักกลางที่มีปริมาณน้อย ในขณะที่แคลเซียม (Ca) จะตรวจพบก่อนการใช้งานเท่านั้นซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นเพราะปริมาณที่น้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญทำให้ตรวจไม่พบโดย SEM หลังการใช้งาน



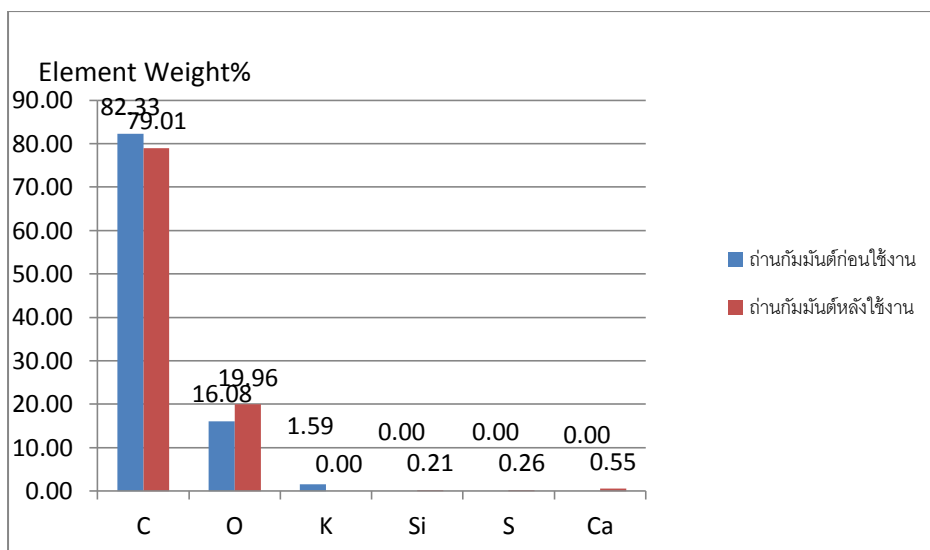
รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบปริมาณธาตุต่างๆ บนพื้นผิวของทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังทำการทดลอง

4.3.2 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวดั้วกลางถ่านกัมมันต์ก่อนการใช้งานและหลังการใช้งาน

สิ่งหนึ่งที่จะเห็นได้ชัดเจนจากการวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านกัมมันต์คืออัตราส่วนมวลของคาร์บอน (C) ที่มีปริมาณมากเกินร้อยละ 80 ของธาตุทั้งหมดที่ตรวจพบบนพื้นผิว ซึ่งค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 82.33% ก่อนการทดลองและ 79.01% หลังจากการทดลอง

สาเหตุที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนอะตอมคาร์บอนลดลงต่างๆ ที่ผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 บ่งชี้ว่ามีการขจัด COD หรือมลสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นเพราะว่ามีธาตุอื่นๆ ปรากฏขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์หลังการใช้งานด้วยมีใช่แค่คาร์บอนแต่เพียงอย่างเดียว โดยออกซิเจน (O) นั้นค่าเฉลี่ยบนพื้นผิวก่อนเริ่มการทดลองจะอยู่ที่ 18.28% แต่เพิ่มขึ้นมาเป็น 19.96% หลังการทดลอง หรือแม้แต่ซิลิคอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และแคลเซียม (Ca) ที่เดิมตรวจไม่พบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ได้ใช้ในการทดลองก็มีปรากฏขึ้นมาหลังจากการทดลอง หากแต่ก็มีธาตุที่ตรวจไม่พบหลังการทดลองคือโพแทสเซียม (K) จากเดิมที่มีอัตราส่วน 1.59% หากแต่อาจจะเป็นไปได้ว่าเพราะปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ จนตรวจไม่พบก็เป็นไปได้

ฉะนั้น ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ดูดซับในการทดลองครั้งนี้จะมีพื้นผิวที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและออกซิเจนมากที่สุดรวมกันถึง 99% ขณะที่ธาตุอื่นๆ นั้นมีปริมาณน้อยกว่า 1% ทั้งสิ้น เมื่อประกอบกับน้ำเสียจากอาคารนั้นมืองค์ประกอบของมลสารเป็นสารอินทรีย์ซึ่งถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จึงทำให้อัตราส่วนของคาร์บอนและออกซิเจนสูงที่สุดเช่นนี้



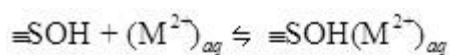
รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบปริมาณธาตุต่างๆ ที่ตรวจพบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการทำาทดลอง

4.3.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวดักกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการใช้งานและหลังการใช้งาน

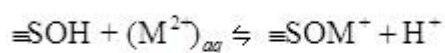
ก่อนการนำถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้งาน การวิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM จะพบอัตราส่วนของมวลคาร์บอน (C) ที่ค่าเฉลี่ย 37.67% ที่พื้นผิว ธาตุที่มีมากในระดับใกล้เคียงกันคือออกซิเจน (O) ที่ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนมวลธาตุ 43.52% ในขณะที่เหล็ก (Fe) ที่ทำการเคลือบผิวซึ่งปรากฏอยู่เป็นอัตราส่วน 16.8% นอกเหนือจากนี้ก็มีธาตุเล็กน้อยอื่นๆ เช่นซิลิคอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) คลอรีน (Cl) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งล้วนแต่มีอัตราส่วนต่ำกว่า 2% และสุดท้ายคือฟอสฟอรัส (P) ที่ตรวจไม่พบ แต่เนื่องจากเหล็กที่เกาะบนพื้นผิวนั้นอยู่ในรูปของ Fe_2O_3 ซึ่งหากออกซิเจนบนพื้นผิวทั้งหมดคือองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ อัตราส่วนระหว่างมวลของเหล็กและออกซิเจนควรจะเป็น 2 ต่อ 1 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นี้มีองค์ประกอบอื่นเจือปนอยู่ด้วย เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์หลังทำการทดลองแล้ว จะตรวจพบธาตุบนพื้นผิวในลักษณะคล้ายกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการทดลองแล้วรวมกัน กล่าวคือจะพบคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นธาตุหลักในเปอร์เซ็นต์ที่สูงโดยเฉลี่ยแล้วจะมีอัตราส่วน 70.6% และ 24.79% สำหรับคาร์บอนและออกซิเจนตามลำดับ อัตราส่วนของฟอสฟอรัส (P) จะเป็นสิ่งที่ตรวจพบเพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนเริ่มการทดลองโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.53% โดยมีมวล ซิลิคอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนมวลที่ตรวจพบบนพื้นผิวดักกลางก่อนการทดลองกลับตรวจไม่พบหลังการทดลอง แต่เนื่องจากอัตราส่วนมวลที่น้อยอยู่แล้วจึงอาจจะสันนิษฐาน

ได้ว่ามีน้อยจนไม่มีนัยสำคัญ อีกธาตุหนึ่งที่ตรวจพบหลังการทดลองแต่ไม่พบก่อนการทดลองคือ แคลเซียม (Ca) ที่มีอัตราส่วนมวลเฉลี่ย 0.62% ขณะที่ธาตุเหล็ก (Fe) นั้นจะมีอัตราส่วนที่ลดลงโดยเหลืออยู่ที่ 3.45%

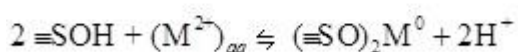
สาเหตุที่อัตราส่วนของธาตุเหล็กที่ตรวจพบบนพื้นผิวของตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และ ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ลดลงนั้นสามารถอธิบายได้จากอัตราส่วนธาตุอื่นที่เปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นเช่นฟอสฟอรัสที่ดูดซับและมาปรากฏบนพื้นผิวของตัวกลางประการหนึ่ง และลักษณะปฏิกิริยา ดูดซับของโลหะไฮดรอกไซด์ฟอสฟอรัสอีกประการหนึ่ง ซึ่งต้องอธิบายถึงสมการ Surface Complexation Model ที่เคยกล่าวไปแล้วดังนี้



outer-sphere complex

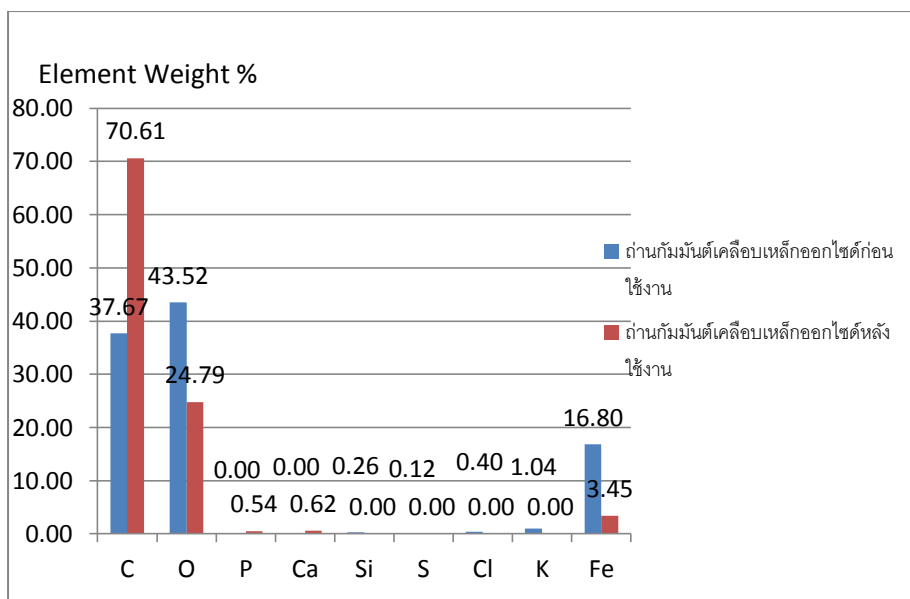


inner-sphere complex



bidentate inner-sphere complex

กล่าวคือ ปฏิกิริยาการดูดซับของเหล็กออกไซด์สองในสามรูปแบบจะเกิดการปล่อยโปรตอน (H^+) ซึ่งทำให้ค่า pH ของน้ำลดลง ซึ่งเมื่อ pH ลดลงต่ำกว่า 3 จะทำให้เหล็ก (Fe^{3+}) ละลายออกมาส่งผลให้ ปริมาณเหล็กที่ตรวจพบบนพื้นผิวลดลงไปด้วย



รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังนำมาใช้งาน

4.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับฟอสฟอรัส

การเปรียบเทียบผลการทดลองของ Xinchao Wei และคณะ (2008) ศึกษาการนำตะกอนกรดของเสีย (Acid mine Drainage Sludge) จากระบบบำบัดน้ำเสียเหมืองถ่านหิน มาใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายออร์โทฟอสเฟต (orthophosphate) ในน้ำเสียชุมชนซึ่งมีรูปแบบการทดลองแบบ Batch คล้ายคลึงกับการทดลองนี้ หากแต่เงื่อนไขการทดลองของ Xinchao Wei และคณะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 20 mg/l และระยะเวลาการผสม 1 ชั่วโมงโดยอาศัยเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวกลาง (ตะกอนกรดของเสีย) ที่ใส่ลงไป ใน Batch เป็นหนึ่งการทดลอง และอีกการทดลองคือใช้ตะกอนกรดของเสียคงที่ 1 g/l แล้วดูพฤติกรรมของการดูดซับในช่วงเวลาต่างๆ กัน

จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการกำจัดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดของตัวกลางตะกอนกรดของเสียจากเหมืองจะมีค่าเท่ากับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์คือ 60 นาที สำหรับการทดลองต่อมาเมื่อใส่ตัวกลางตะกอนกรดของเสียลงไป ในอัตราส่วน 1 g/l จะมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากที่สุดคือดูดซับฟอสฟอรัสจนเหลือความเข้มข้นน้ำออก 1.02 mg/l ใน 60 นาที หรือเท่ากับอัตราส่วน X/M เป็น 18.8 mgP/g เปรียบเทียบกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จากการทดลองนี้ซึ่งจากตาราง X/M จะพบว่าค่าสูงสุดจะมีแนวโน้มเข้าใกล้ 0.08 mgP/g ถ่านกัมมันต์หากค่า X/M มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงขึ้นไปถึง 20 mg/l จะมีค่า X/M ที่หาได้จากเส้นแนวโน้มประมาณ 0.11 mgP/g ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นั้นจากสมการแนวโน้มจะพบว่าที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน 20 mgP/l นั้นค่า X/M จะมีค่า 0.27 mgP/g

แต่หากทำการวัดอัตราส่วนมวลผลสารที่ดูดซับได้ต่อปริมาณเหล็กออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จากการทดลองนี้แล้วจะพบว่า หากคำนวณจากสมการในรูปที่ 4.1.16 เพื่อหาค่า X/M ที่ 20 mgP/l ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะมีค่า X/M ที่ 5.91 mgP/g และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์มีค่า X/M ที่ 2.68 mgP/g

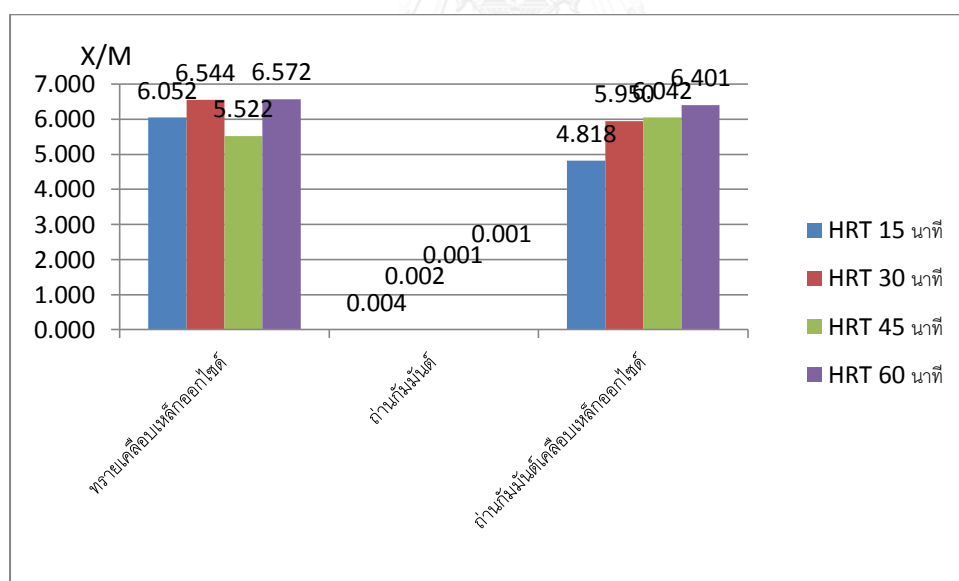
สาเหตุที่ทำให้ตะกอนของเสียจากเหมืองในการทดลองของ Xinchao Wei และคณะ มีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หรือถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์อาจอธิบายได้ด้วยสมบัติของตัวกลางที่เกิดจากการตกตะกอนของโลหะออกไซด์และลักษณะที่เป็นอนุภาคตะกอนขนาดเล็กมีใช้การเคลือบผิวหน้าของตัวกลางที่ไม่มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสโดยตัวเองด้วยสารที่มีสมบัติในการดูดซับฟอสฟอรัสเช่นการทดลองนี้

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมตัวกลางของการทดลองของ Xinchao Wei และคณะจะถูกกว่าอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการนำตะกอนของเสียกลับมาใช้ใหม่จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมตัวกลาง ขณะที่การทดลองนี้ใช้สารเคมีที่ต้องสั่งซื้อและจัดเตรียม โดยเฉพาะสารเคมี $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งมี

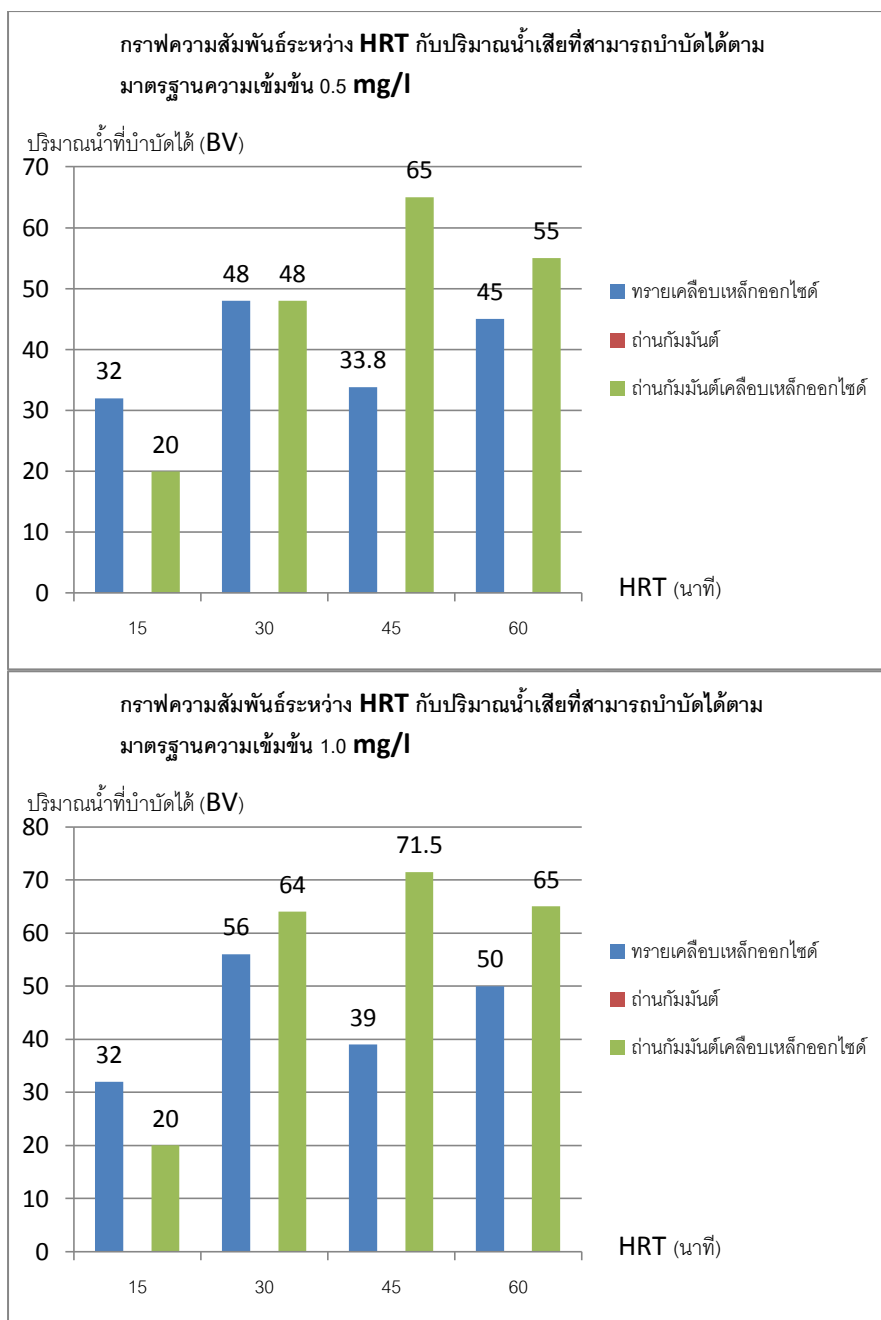
ราคาประมาณ 2,000 บาทต่อ 500 กรัม ซึ่งจะสามารถใช้เตรียมตัวกลางเคลือบเหล็กออกไซด์ได้สูงสุด 5 กิโลกรัมเท่านั้นหากใช้วิธีตามที่กำหนดไว้

4.5 การเปรียบเทียบสมรรถภาพของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง 3 ชนิดในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย

4.5.1 ค่า X/M จากการคำนวณผลการทดลอง ค่า X/M หรืออัตราส่วนมวลของมลสารต่อมวลตัวกลาง ดูดซับโดยดูจากผลการทดลองกับคอลัมน์บำบัดน้ำเสียจริงและจุด Breakthrough จะพบว่าหากคำนวณเฉพาะเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวของตัวกลางแล้ว ทั้งถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะมีค่า X/M ที่จุด Breakthrough ที่ใกล้เคียงกันที่ 6.0 mgP/g ดังรูปที่ 4.29 โดยมีจุดที่น้ำสังเกตอยู่ที่จุด Breakthrough ของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ HRT 15 นาทีซึ่งจะมี X/M แค่ 4.8 mgP/g ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสที่ต่ำลงเมื่อค่า HRT ของน้ำที่ผ่านเข้าระบบบำบัดต่ำกว่า 15 นาทีของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วน X/M ที่จุด Breakthrough ของแต่ละตัวกลางที่ HRT ต่างๆ กัน



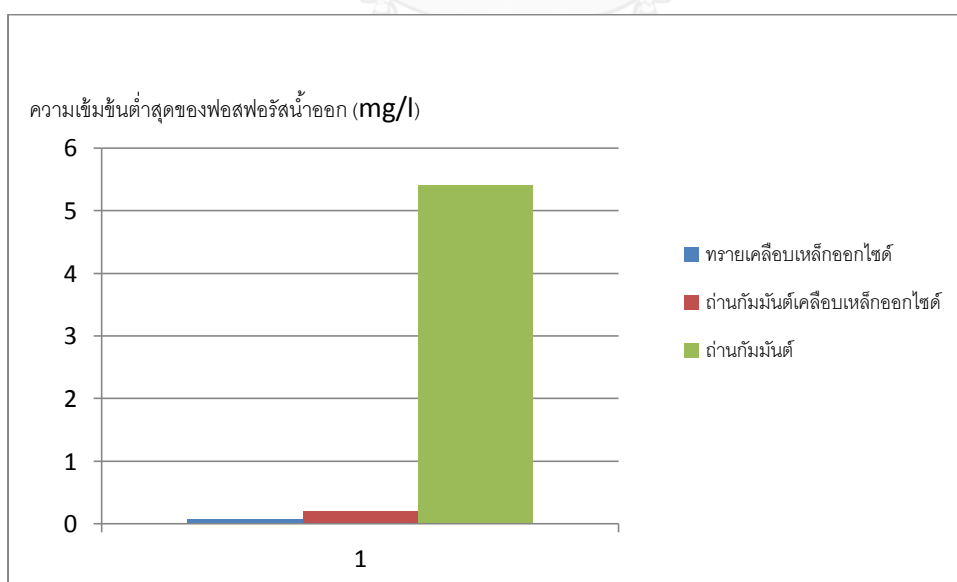
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำเสียที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ตามมาตรฐาน 0.5 mg/l (บน) และ 1.0 mg/l (ล่าง) ที่ Hydraulic Retention Time 15, 30, 45 และ 60 นาที

4.5.2 สมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดเมื่อทำการทดสอบกับน้ำเสียจริง

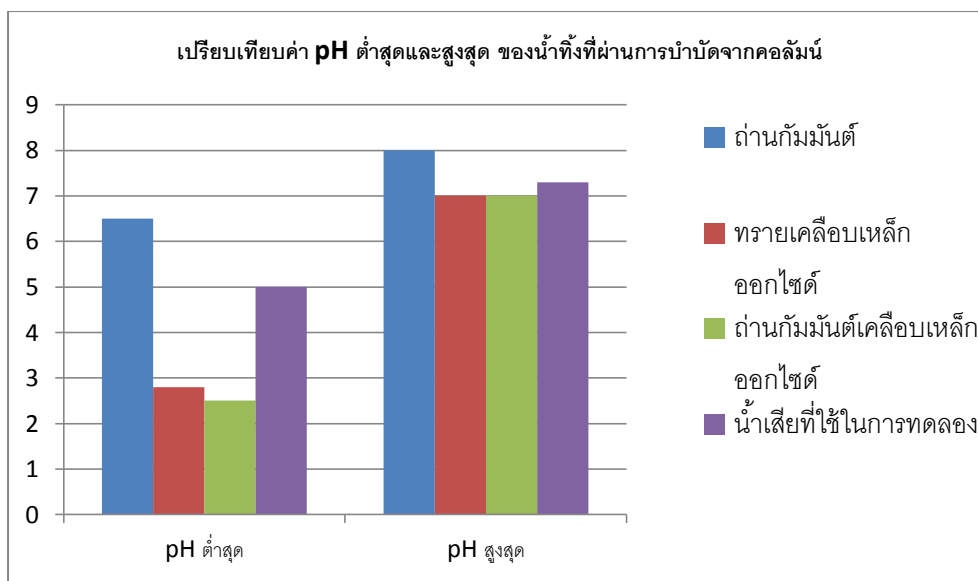
จากตารางที่ 4.1 น้ำทิ้งที่นำมาทดลองแบบคอลัมน์มีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสเฉลี่ย 6.41 mg/l, pH 6.0 และ COD 46.5 mg/l เมื่อวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ได้หลังผ่านการบำบัดพบว่า ถ่านกัมมันต์มีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสไม่เปลี่ยนแปลงจากน้ำที่นำมาบำบัดเท่าใดนัก โดยค่าต่ำสุดที่ได้คือ 5.4 mg/l ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่ำสุดที่ 0.2 mg/l และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ 0.1 mg/l

แต่สำหรับค่า pH ที่ได้ซึ่งในกรณีของถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่า pH เฉลี่ยอยู่ที่ 3 ก่อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อตัวกลางสูญเสียประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ซึ่งพบว่าค่า pH จะไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งกำหนดไว้ที่ 6-7 ขณะที่ถ่านกัมมันต์นั้นค่า pH จะอยู่ที่ประมาณ 6-7

เมื่อวิเคราะห์ค่า COD เห็นได้ว่ามีเพียงถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์เท่านั้นที่มีผลกับค่า COD ซึ่งค่าสูงสุดที่สามารถบำบัดได้คือลด COD ลงไปที่ 20.87 mg/l เท่ากัน ข้อแตกต่างอยู่ที่ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ ซึ่งถ่านกัมมันต์จะสามารถคงประสิทธิภาพไว้ได้ตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 24 Bed Volume และเมื่อระยะเวลาใกล้กับน้ำอยู่ที่ 1 ชั่วโมงเท่านั้น เมื่อพิจารณาที่มาตรฐานน้ำทิ้งตามกฎหมายที่กำหนด COD ไว้ไม่เกิน 100 mg/l นี้จึงไม่ใช่เรื่องที่ต้องกังวลมากนัก



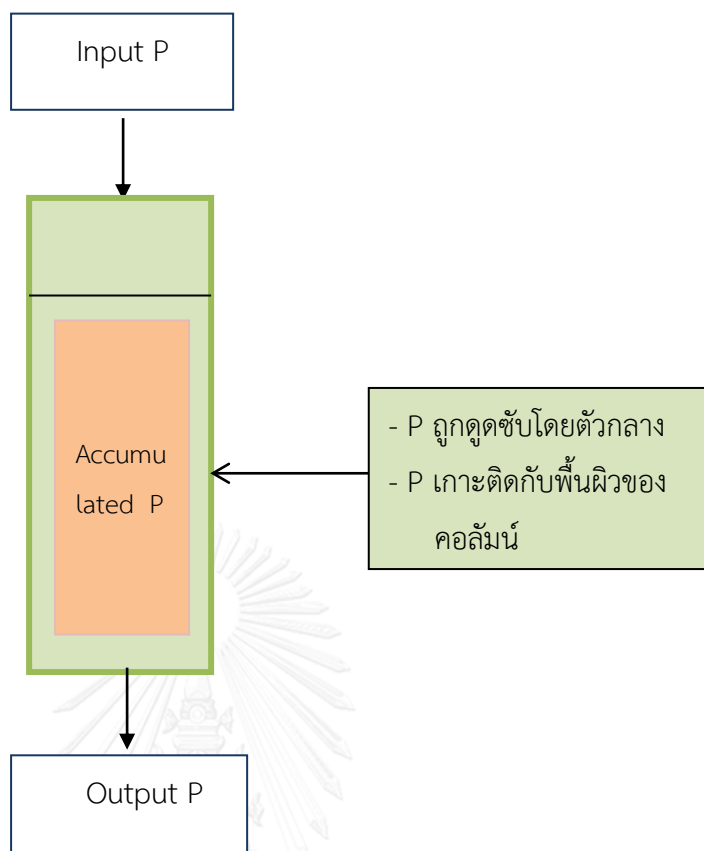
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุดของแต่ละตัวกลางโดยอ้างอิงจากความเข้มข้นน้ำที่ผ่านการบำบัด



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า pH น้ำออกที่ต่ำสุดและสูงสุดที่วัดได้

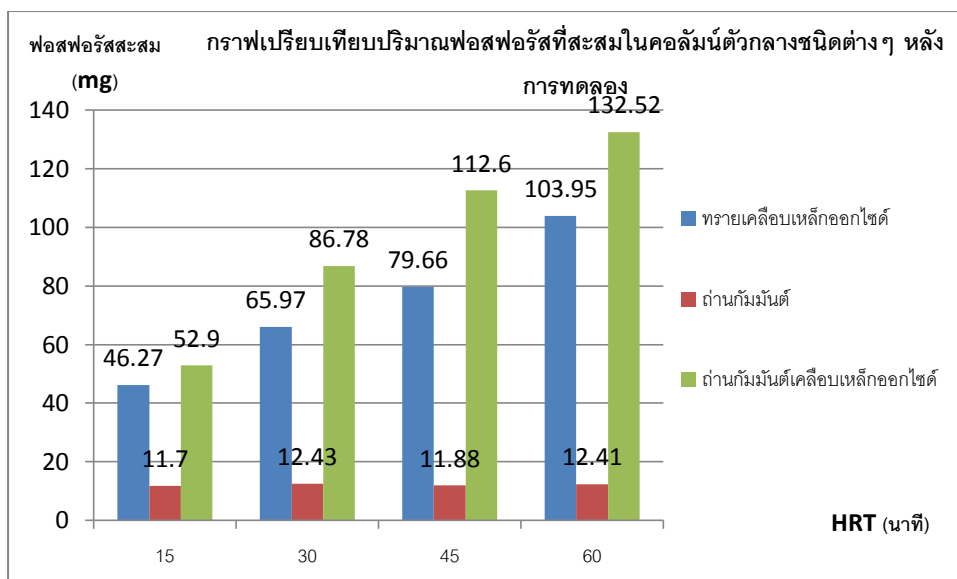
4.5.3 สมดุลมวลของฟอสฟอรัสในการทดลองแบบคอลัมน์

เนื่องจากฟอสฟอรัสที่ละลายในน้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบคอลัมน์ทดลองนั้นไม่สามารถระเหยออกไปจากระบบได้ และระบบไม่มีการรั่วไหลของน้ำเสียหรือตัวกลางที่ใช้ในระบบ ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในการทดลองนี้จะถูกดูดซับโดยตัวกลางหรือออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วหรือตกค้างอยู่บนผิวของคอลัมน์เท่านั้นดังรูปที่ 4.33 ซึ่งจะเห็นว่าฟอสฟอรัสที่เข้าสู่ระบบนั้นส่วนหนึ่งจะถูกดูดซับโดยตัวกลาง ส่วนหนึ่งอาจจะตกค้างบนผิวคอลัมน์ ขณะที่อีกส่วนที่ดูดซับไม่หมดจะปล่อยออกไปกับน้ำที่ออกจากระบบ



รูปที่ 4.33 แสดงสมดุลมวลของฟอสฟอรัสในระบบการดูดซับ

ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบการทดลองและตกค้างอยู่ภายในคอลัมน์ตัวกลางรวมถึงวิธีการคำนวณนั้นสามารถอ้างอิงได้จากภาคผนวก ง. และเมื่อนำฟอสฟอรัสละลายน้ำสะสมในตัวกลางชนิดต่างๆ มาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบจะได้ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสสะสมในตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลา HRT ต่างกัน

จากกราฟจะเห็นได้ว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งที่นำมาใช้ทำการทดลองได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ตัวกลางแต่ละชนิดสามารถบำบัดให้อยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งได้และจากปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางทรายที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ แม้ว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางแต่ละชนิดที่จุดยุติจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อ HRT สูงขึ้น แต่ก็ยังเป็นเพราะลักษณะการทดลองที่ใช้คอลัมน์ต่อเรียงกันแบบอนุกรมที่อัตราการไหลคงที่ซึ่งจะสามารถคำนวณเปลี่ยนเป็น HRT ที่ต่างกันที่แต่ละคอลัมน์ได้จึงทำให้ HRT ที่สูงขึ้นจะมีปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างในระบบมากขึ้นตามไปด้วย

กระนั้นกราฟนี้ก็ไม่สมบูรณ์นักเนื่องจากไม่มีวิธีการที่จะวิเคราะห์หาฟอสฟอรัสที่ติดอยู่กับพื้นผิวของคอลัมน์ ทำให้ข้อมูลในกราฟเป็นค่ารวมของฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ตกค้างในระบบ ทั้งที่ติดกับพื้นผิวคอลัมน์บรรจุตัวกลางและที่ถูกดูดซับโดยตัวกลาง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์และทรายมีสมบัติในการดูดซับฟอสฟอรัสซึ่งเกิดโดยหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะตัวอยู่บนพื้นผิวเหล็กออกไซด์ตอนสัมผัสกับน้ำ แต่ปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลแตกตัวให้ H^+ ออกมา ซึ่งส่งผลให้ค่า pH ของน้ำลดลงทราบเท่าที่ยังเกิดปฏิกิริยาดูดซับอยู่
2. ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำมากจนแทบไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสละลายน้ำตั้งต้นเนื่องจากความสามารถในการดูดซับแปรผันกับความเข้มข้นตั้งต้นของสารละลาย อย่างไรก็ตามความสามารถในการลด COD ของถ่านกัมมันต์นั้นจะดีที่สุดในส่วนตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง
3. ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มวลเท่าๆ กัน แต่ทั้งนี้ก็เป็นเพราะถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์มีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่มากกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ปริมาตรเท่ากัน และยกเว้นในกรณีระยะเวลาเก็บน้ำในระบบคอลัมน์ต่ำกว่า 15 นาที
4. ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งให้ได้ตามมาตรฐานทั้ง 2 แบบได้ปริมาณน้ำที่ผ่านมาตรฐานมากที่สุดที่ HRT 30 นาที ขณะที่ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์นั้นจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ HRT 45 นาที หากแต่ค่า pH ที่ลดลงทำให้การใช้ตัวกลางนี้ไม่เหมาะสมจะนำมาใช้บำบัดจริงเนื่องจากต้องทำการปรับสภาพกรด-ด่างของน้ำหรือเติมบัฟเฟอร์เพื่อรักษาค่า pH ให้คงที่อันจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น
5. สำหรับการพิจารณาความคุ้มค่าในการนำถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์หรือทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้จริงนั้น ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพยังมีค่าสูงสุดไม่เกิน 71 Bed Volume สำหรับค่ามาตรฐานออกแกนิกฟอสฟอรัสที่ 0.5 mg/l สำหรับถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ และไม่เกิน 56 Bed Volume สำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ปัญหาและข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม

1. ถ่านกัมมันต์มีสมบัติบางอย่างที่ทำให้การวัดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสละลายน้ำออกมาสูงกว่าปกติ แม้เมื่อนำถ่านกัมมันต์ดังกล่าวมาแช่น้ำกลั่นทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งวันก่อนทำการทดลองจะลดความคาดเคลื่อนนี้ลงไปจนแทบไม่มีนัยสำคัญ แต่ก็ยังมีโอกาสคาดเคลื่อนได้อยู่ ในกรณีที่น่าไปใช้กับสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตความเข้มข้นต่ำกว่า 3 mg/l ทำให้ต้องทำการทดลองหลายครั้งเพื่อหาข้อผิดพลาดและจำกัดความคลาดเคลื่อนนี้
2. ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์มีปัญหาฝุ่นทรายขนาดเล็กละเอียดที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าความเป็นจริงหากหลุดออกมา ทำให้ต้องมีกระบวนการล้างและทำความสะอาดทรายก่อนนำมาผ่านกระบวนการทำเป็นทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์และก่อนนำมาใช้งาน
3. คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองควรจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน จะสามารถเก็บน้ำตัวอย่างได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ เช่น เหล็กละลายน้ำ, ค่าความขุ่น ได้ และทำให้สามารถทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์บางอย่าง เช่น COD ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น
4. ถ้าหากสามารถควบคุมค่า pH ให้คงที่และสูงกว่า 3 ได้ตลอดการทำงานหรือการทดลอง ก็จะทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องเหล็กที่เคลือบถ่านกัมมันต์ละลายออกมาปะปนกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเพราะเหล็กออกไซด์ (Fe^{3+}) จะไม่ละลายออกมากับน้ำ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

1. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ลงวันที่ 7 เมษายน 2553 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 127 ตอนพิเศษ 69 ง วันที่ 2 มิถุนายน 2553
2. ธรรม รุ่งประกอบกิจ, การกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์โดยตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และตัวกลางทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541
3. สมบูรณ์ ประถมศรีเมฆ, การกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2543

ภาษาอังกฤษ

1. American Public Health Association, American Water work Association, Water Environment Federation – 1999
2. Chinese's Department of Health Order Wei-Shu-Huan-Tzu ,China Water Pollution Control Act [Online] Available from <http://law.epa.gov.tw/en/laws/480770486.html> (Accessed: 8/2/13)
3. D.A. Dzombak and F.M.M. Morel. Surface Complexation Modeling: Hydrous Ferric Oxide - 1990
4. D.O. Cooney, Adsorption design for wastewater treatment – 1998
5. D.W. Schindler, R.E. Heckey, D.L. Findlay, M.P. Stainton, B.R. Parker, M.J. Paterson, K.G. Beaty, M. Lyng and S.E.M. Kasian. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 105: 11254-11258. – 2008
6. European Environment Agency, Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD) - 2009

7. Forstner and Wittmann, Metal Pollution in the Aquatic Environment, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg- 1981
8. Gh. Ghanizadeh, M.H. Ehrampoush and M.T. Ghaneian. Application of Iron impregnated Activated Carbon for Removal of Arsenic from water. Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng. Vol. 7, No. 2, page 145-156 – 2010
9. G.J.F Smolders, J. van der Meij, M.C.M van Loosdrecht, and J.J. Heijnen, Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence. Biotechnology and Bioengineering 43, page 461-470. – 1994
10. Holleman, N. Wiberg. "XV 2.1.3". Lehrbuch der Anorganischen Chemie (33 ed.). de Gruyter-1985
11. J. Peng, B. Wang., Y. Song, P. Yuan and Z. Liu. Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilizing pond. Ecological Engineering 31 page 92-97 - 2007
12. J. Mack, Learn about lake: Eutrophication, University of Miami, 2010 [Online], Available from <http://www.lakescientist.com/learn-about-lakes/water-quality/eutrophication.html> (Accessed: 25/12/12)
13. Khaodhiar S. Removal of Chromium, Copper and Arsenic from Contaminate Groundwater using Iron-Oxide Composite Adsorbents. Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Oregon State University - 1997
14. M.A. Anderson and A.J. Rubin, Adsorption of inorganics at solid liquid interfaces. Ann Arbor Science Publ - 1981
15. M. Arias, J. Da Silva-Carbolal, L. Garcia-Rio, J. Mejuto and A. Nunez. Retention of Phosphorus by iron and aluminum-oxides-coated quartz particles. Journal of Colloid and Interface Science 29 page 65-70 - 2006
16. M. Bodzek, Z. Debkowska, E. Lobos and K. Konieczny. Biomembrane wastewater Treatment by activated sludge method. Desalination 107, page 83-95 - 1996

17. M. Edward and M. M. Benjamin. Adsorptive filtration using Coated Sand a new approach for treatment of metal-bearing wastes. Journal WPCF Vol. 1, page 1523-1533 – 1989
18. Ministry of Environment, Government of Japan, Technology Transfer Manual of Industrial Wastewater Treatment, page 43-45 – 2003
19. N. Sawyer, P.L. Mccarty and G.F. Parkin. Chemistry for Environmental Science and Engineering - 1994
20. P. Glynn, USGS, 2003 [Online], Available from <http://www.ndsu.edu/pubweb/~sainieid/geochem/PHREEQCi-course-notes/phreeqci-sorption&kinetics> Accessed 1/1/2013
21. R. K. Harris, T. V. Tompson, P. R. Norman and C. Pottage. Phosphorus-31 NMR studies of adsorption onto activated carbon. Carbon 37, page 1425-1430 – 1999
22. S. Atkinson. Research Studies predict strong growth for MBR markets. Membrane Technology. – 2006
23. T. C. Wang, K.P. Chandra and Paul R. Anderson. Evaluation of Fe Oxide Coated Granular Activated Carbon for Removal and Recovery of Cu (III) and Cr (VI) from aqueous solution. Waste Management and Research Center, Illinois institute of technology Electronic Publication - 1994
24. T. Clark, T. Stepenson and P.A. Pearce. Phosphorus removal by chemical precipitation in Biological Aerated filter. Wat.Res. Vol. 31, No 10, page 2557-2563-1997
25. US Environmental Protection Agency, Nutrients Pollution Policy and Data - 2012
26. Van Haandel and J. van der Lubbe. Handbook Biological Wastewater Treatment: Design of Activated Sludge System - 2007
27. Xinchao Wei., Roger C. Viadero Jr. and S. Bhojappa. Phosphorus removal by acid mine drainage sludge from secondary effluent of municipal wastewater treatment plants. Water Research 42 page 3275-3284 – 2008



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ภาคผนวก ก. 1 วิธีการวัดความเข้มข้นฟอสฟอรัสโดยกรดแอสคอบิก (American Public Health Association, American Water work Association, Water Environment Federation – 1999)

1.1 หลักการ

แอมโมเนียมโมลิบเดตและโพแทสเซียมแอนติโมนิตาเตรตสามารถทำปฏิกิริยากับอโโทฟอสเฟตในสารละลายกรดเกิดเป็นเฮเทอโรโพลีเอซิด-ฟอสโฟโมลิบดิกเอซิด ซึ่งจะเปลี่ยนสีเป็นโมลิบดินัมบลูโดยกรดแอสคอบิก

1.2 ปัจจัยรบกวนผลการวิเคราะห์

-อาร์ซีเนท (AsO_4^{3-}) ทำปฏิกิริยากับโมลิบเดตจะได้สีน้ำเงินเช่นเดียวกับฟอสเฟต ซึ่งสามารถรบกวนผลการวิเคราะห์ได้หากมีความเข้มข้นในน้ำตัวอย่างมากกว่า 0.1 mg As/l

-สารประกอบโครเมียม 6+ (Cr^{6+}) และ NO_2^- จะรบกวนผลการวิเคราะห์ให้ต่ำกว่าปกติประมาณ 3% หากมีความเข้มข้นในน้ำตัวอย่างประมาณ 1 mg/l และการวิเคราะห์จะผิดพลาดน้อยกว่าความเป็นจริงได้ถึง 10-15% หากมีความเข้มข้นมากกว่า 10 mg/l

-ซัลไฟด์ (Na_2S) ไม่ส่งผลกระทบต่อหากมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1-10 mg/l

1.3 ความละเอียดในการวิเคราะห์

ประมาณ 10 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ตามตารางต่อไปนี้

Approximate P Range mg/L	Light Path cm
0.30–2.0	0.5
0.15–1.30	1.0
0.01–0.25	5.0

1.4 การจัดเตรียมอุปกรณ์

1.4.1 อุปกรณ์การวัดคลื่นแสง

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) พร้อมด้วยหลอดเก็บตัวอย่างสำหรับวัดคลื่นแสงที่ 880 นาโนเมตร มีความกว้างสำหรับให้แสงผ่าน 2.5 ซม. หรือมากกว่า

- แผ่นกรองแสงสีแดง 0.5 ซม.

1.4.2 สารเคมี

A) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 5N: จัดเตรียมโดยละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 70 ml. ลงในน้ำกลั่นจนได้ ปริมาตร 500 ml.

B) โพแทสเซียมแอนติโมนิตาเตรต: จัดเตรียมโดยละลาย $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 0.5H_2O$ น้ำหนัก 1.3715 กรัมในน้ำกลั่น 400 ml. จากนั้นเติมให้ได้ปริมาณ 500 ml. เก็บรักษาในขวดมีจุกแก้วปิดฝา

C) สารละลายกรดแอสคอบิก 0.1 Mo/L, ละลายกรดแอสคอบิก 1.76 กรัมในน้ำกลั่น 100 ml. สารละลายจะเสถียรเป็นเวลา 1 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ $4^\circ C$

D) สารละลายแอมโมเนียม โมลิบเดต: จัดเตรียมโดยละลาย $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ น้ำหนัก 20 กรัม กับน้ำกลั่น 500 ml. เก็บรักษาในขวดมีจุกแก้วปิดฝา

E) สารละลายรวม จัดเตรียมโดยทำการผสมสารละลายใน A), B), C) และ D) เข้าด้วยกันตามลำดับ และอัตราส่วนดังต่อไปนี้

- H_2SO_4 5N 50 ml.

-สารละลายโพแทสเซียมแอนติโมนิตาเตรต 5 ml.

-สารละลายแอมโมเนียม โมลิบเดต 15 ml.

-สารละลายกรดแอสคอบิก 30 ml.

กวนผสมทุกครั้งทีผสมสารใหม่เข้าไป และจนกว่าสารละลายจะลดอุณหภูมิลงมาเท่ากับอุณหภูมิห้อง หากมีความขุ่นปรากฏขึ้นในสารละลาย ให้เขย่าและปล่อยให้วัระยะหนึ่งให้ความขุ่นหายไปก่อนจะนำไปใช้งาน สารละลายผสมนี้จะเสถียรเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

F) สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

จัดเตรียมโดยการละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่อบแห้ง 0.2197 กรัมในน้ำ กลั่น 1 ลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 50 mg-P/l

G) สารมาตรฐาน Blank

ใช้น้ำกลั่นธรรมดา

1.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

1) การเตรียมกราฟมาตรฐาน

a) ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตในหัวข้อ 1.4.2 F) มา 5 ml. แล้วปรับปริมาตรโดยน้ำกลั่นจน กลายเป็น 500 ml. จะได้สารละลายความเข้มข้น 0.5 mg-P/l. ซึ่งจะเรียกว่า Intermediate Standard Solution

b) ปิเปต Intermediate Standard Solution มา 10, 15, 20, 30, 40 และ 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนกลายเป็น 100 ml. ก็จะได้สารละลายมีความเข้มข้น 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.5 mg-P/l ตามลำดับ

c) ปิเปตสารละลายที่ได้ใน b) และ Blank ใน G) มา 50 ml. หยดฟีนอล์ฟทาลินลงไป 1 หยดเล็กๆ หากพบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีแดงให้เติม H_2SO_4 5N ที่เตรียมไว้ลงไปทีละหยดจนสีหายไป จากนั้นเติมสารละลายรวมในข้อ 1.4.2 E) ลงไป 8 ml. แล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10-30 นาที แล้วจึงนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ 880 นาโนเมตร

d) จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้เป็นกราฟมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบ

2) การวัดความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำตัวอย่าง

a) ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 50 ml. หยดฟีนอล์ฟทาลินลงไป 1 หยดเล็กๆ หากพบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีแดงให้เติม H_2SO_4 5N ที่เตรียมไว้ลงไปทีละหยดจนสีหายไป จากนั้นเติมสารละลายรวมในข้อ 1.4.2 E) ลงไป 8 ml. แล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10-30 นาที แล้วจึงนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ 880 นาโนเมตร

b) จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้แล้วนำไปเทียบกับกราฟในข้อ 1.4.3 1)

c) กรณีน้ำตัวอย่างขุ่น ให้ใช้น้ำตัวอย่างเปล่าๆ มาเติมสารทุกชนิดตามอัตราส่วนที่กำหนดยกเว้นกรดแอสคอบิกและโพแทสเซียมแอมโมเนียมตาเตรต วัดค่าการดูดกลืนแสงแล้วนำไปลบกับค่าที่ได้จากน้ำตัวอย่างที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงตามวิธีปกติ

1.4.4 การคำนวณ

$$\text{mg P/L} = \frac{\text{mg P (in approximately 58 mL final volume)} \times 1000}{\text{mL sample}}$$

ภาคผนวก ก. 2 การวิเคราะห์ซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด/การติเตรท (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

หลักการ

หลักการการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิดจะเหมือนกับวิธีการรีฟลักซ์แบบเปิด แต่มีข้อดีคือสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่ายจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้มากกว่าในระบบปิดเมื่อเทียบกับการรีฟลักซ์ในระบบเปิดเพราะมีเวลาสัมผัสกับสารออกซิไดส์ได้นานกว่า ก่อนทำการทดลองควรตรวจสอบฝาปิดหลอดแก้วว่ามีรอยแตกตรงรอยต่อของ TFE liner หรือไม่ การเลือกขนาดของหลอดที่ใช้ขึ้นอยู่กับความไว (sensitivity) ที่ต้องการ

สำหรับตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำควรใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร เพราะจะต้องใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่มาก

เครื่องมือและอุปกรณ์

หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessel) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกตขนาด 16 x 100 มม. หรือ 20 x 150 มม. ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี

Heating Block อลูมิเนียมตันลึก 45 – 50 มม. มีรูขนาดพอดีหลอดแก้ว หรือขาตั้งใส่หลอดแก้ว บล็อกฮีตเตอร์ (Block Heater) หรือตุ๋น ควบคุมอุณหภูมิที่ 150 +/- 2 องศาเซลเซียส ต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 องศาจะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วเสียหาย

สารเคมี

สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N เตรียมโดยการละลาย 4.913 กรัม $Kr_2Cr_2O_7$ อบแห้งที่ 103°C 2 ชั่วโมงในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรด H_2SO_4 conc 167 มิลลิลิตร และเติม $HgSO_4$ 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร

สารละลายกรดซัลฟิวริก จัดเตรียมโดยเติมผง Ag_2SO_4 22 กรัม ลงใน H_2SO_4 Conc 4 กิโลกรัม ทิ้งไว้ 1-2 วันให้ Ag_2SO_4 ละลาย

สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยละลาย 1.485 กรัม 1,10 ฟีนานโทลีนโมโนไฮเดรต และ 695 มิลลิกรัม $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต จัดเตรียมโดยนำ $HOOC_6H_4COOK$ มาบดแล้วอบแห้งที่ 120°C ชั่งมา 425 มิลลิกรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้จะมีค่า COD เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) ประมาณ 0.10 N จัดเตรียมโดยละลาย 39.2 กรัม $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (FAS) ในน้ำกลั่น เติม H_2SO_4 Conc 20 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร นำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งที่ใช้

การหาความเข้มข้นของ FAS

เติมสารเคมีทุกชนิดตามตาราง ข.3.1 ลงในหลอดแก้วขนาดที่ต้องการ โดยใช้ น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำทิ้งให้เย็นลง แล้วเติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไตเตรทด้วยสารละลาย FAS

$$FAS \text{ Normality} = \frac{\text{ปริมาตรของ } 0.1N \text{ Kr}_2\text{Cr}_2\text{O}_7(\text{ml.}) \times \text{ความเข้มข้นของ Kr}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรต (ml.)}$$

ตารางที่ ก.2.1 ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับขวดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดของหลอดแก้วย่อยสลาย	ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)	ปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (มล.)	สารละลายกรดซัลฟิวริก (มล.)	ปริมาตรรวม (มล.)
16x100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20x150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25x150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0

วิธีวิเคราะห์

1 ใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารเคมีตามตารางที่ ข.3.1 โคนเติมตัวอย่างน้ำในหลอดแก้ว แล้วเติมโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย แล้วค่อยๆ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกให้เกิดชั้นกรดที่ก้นหลอดแก้ว ปิดฝาแล้วแกว่งขวดเพื่อผสมสารละลาย (ถ้า COD มากกว่า 500 มข./ลิตร ให้ลดปริมาณน้ำตัวอย่างลงแล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบตามตาราง)

2 นำหลอดแก้วใส่ขวดตั้งแล้วเข้าตู้อบ 150 องศาเซลเซียสต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3 เปิดฝาหลอดแก้ว เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไตเตรทด้วย 0.1 N FAS จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง

4 ทำ Blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนตัวอย่างแล้วทำตามข้อ 1-3 ทุกประการ

การคำนวณ

$$COD \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)}}$$

โดย A = ปริมาตรสารละลาย FAS ที่ใช้ไตเตรตแบลงค์ ml.

B = ปริมาตรสารละลาย FAS ที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง ml.

N = ความเข้มข้นของสารละลาย FAS, Normality

หากตัวอย่างน้ำมี COD น้อย ให้ทำการลดความเข้มข้นของ FAS ลงโดยเจือจางกับน้ำกลั่น

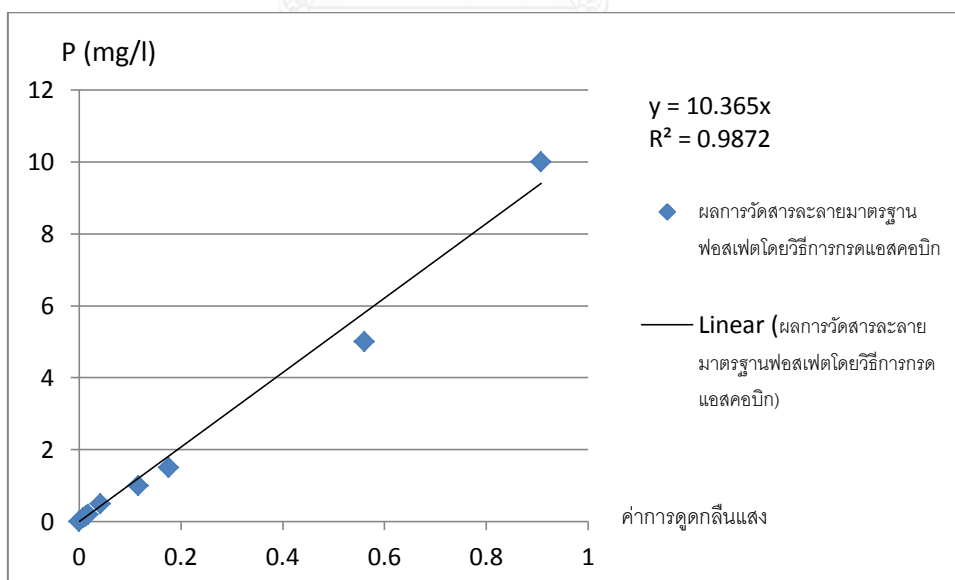


ภาคผนวก ก. 3 ผลการวัดสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตด้วยวิธีการกรดแอสคอบิกและกราฟมาตรฐาน

ตาราง ก. 3.1 ความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นของน้ำตัวอย่าง (mg/l)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง 880 nm ที่วัดได้ (A)
0	0
0.1	0.008
0.15	0.014
0.2	0.018
0.5	0.042
1	0.116
1.5	0.176
5	0.561
10	0.908

รูปที่ ก. 3.1 กราฟมาตรฐานการความเข้มข้นฟอสฟอรัสสำหรับการวัดด้วยวิธีการกรดแอสคอบิก



ภาคผนวก ข.

การทดลองที่ 1

ตารางที่ ข. 1 การศึกษาไอโซเทิร์มของฟอสฟอรัสโดยใช้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตในระบบ Batch
ตัวกลาง: ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์

ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ 5 กรัมในสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 100 ml					
เวลา	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)
0	1	3	5	7	10
5	0.59	1.79	3.66	4.88	6.85
10	0.59	1.76	3.66	4.77	6.84
20	0.58	1.78	3.36	4.65	6.67
40	0.58	1.78	3.37	4.07	6.32
60	0.56	1.67	3.37	3.85	6.47

ตารางที่ ข. 2 การศึกษาไอโซเทิร์มของฟอสฟอรัสโดยใช้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตในระบบ Batch
ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ 5 g ในสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 100 ml					
เวลา	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)
0	1	3	5	7	10
5	0.93	2.63	4.69	5.64	8.50
10	0.95	2.64	4.69	5.58	8.50
20	0.82	2.51	3.98	5.73	8.49
40	0.82	2.54	4.01	5.69	8.50
60	0.85	2.49	4.09	5.66	8.61

ตารางที่ ข. 3 การศึกษาไอโซเทิร์มของฟอสฟอรัสโดยใช้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตในระบบ Batch
 ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ 5 กรัมในสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 100 ml					
time	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)
0	1	3	5	7	10
5	1.11	2.51	5.27	5.39	9.06
10	1.06	2.03	4.92	5.06	8.73
20	0.993	1.89	4.19	4.45	7.73
40	0.75	1.84	3.62	4.26	6.42
60	0.56	1.74	3.13	3.70	5.86

การทดลองที่ 2

ตารางที่ ข. 4 การศึกษาการดูดซับของฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งในระบบ Batch 100 ml โดยใช้ปริมาณ
ตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)
0	6.42	5.17	5.42	6.42	5.46
5	5.89	3.42	4.64	6.12	4.47
10	5.74	3.60	4.13	6.01	3.82
20	5.82	2.78	2.70	5.96	2.62
40	5.89	1.91	2.64	5.08	2.15
60	5.71	2.64	2.40	4.47	2.44

ตารางที่ ข. 5 การศึกษาการดูดซับของฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งในระบบ Batch 100 ml โดยใช้ปริมาณ
ตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)
0	6.42	4.91	4.91	6.42	4.91
5	6.17	4.77	4.58	6.35	4.73
10	6.21	4.88	4.66	6.36	4.52
20	6.41	4.87	4.58	6.43	4.59
40	6.38	4.85	4.67	6.29	4.50
60	6.36	4.85	4.40	5.96	4.54

ตารางที่ ข. 6 การศึกษาการดูดซับของฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งในระบบ Batch 100 ml โดยใช้ปริมาณ
ตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)	P (mg/l)
0	6.42	4.57	5.16	6.42	4.77
5	6.32	4.38	5.30	5.79	4.52
10	6.02	4.32	4.96	5.60	3.94
20	5.98	3.48	3.72	3.62	3.39
40	5.44	2.99	2.72	2.07	2.19
60	4.62	2.96	1.96	1.66	1.27

ตารางที่ ข. 7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า COD จากน้ำทิ้งในระบบ Batch 100 ml โดยใช้
ปริมาณตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)
0	60	53.33	44.31	54.86	17.35
5	60	48.48	44.31	54.86	17.35
10	51.43	38.79	36.92	54.86	17.35
20	51.43	38.79	36.92	54.86	17.35
40	51.43	38.79	36.92	54.86	17.35
60	51.43	38.79	36.92	54.86	17.35

ตารางที่ ข. 8 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า COD จากน้ำทิ้งในระบบ Batch 100 ml โดยใช้ปริมาณตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)
0	51.43	50	36.92	54.86	36.92
5	42.86	50	24.62	41.14	24.62
10	42.86	40	24.62	27.43	24.62
20	34.29	30	24.62	27.43	24.62
40	34.29	30	24.62	13.71	12.31
60	34.29	30	24.62	13.71	12.31

ตารางที่ ข. 9 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า COD จากน้ำทิ้งในระบบ Batch โดยใช้ปริมาณตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)	COD (mg/l)
0	60	22.86	31.31	54.86	45.71
5	42.86	15.24	20.87	41.14	45.71
10	42.86	30.47	31.30	41.14	53.33
20	42.86	30.47	31.30	54.86	53.33
40	25.71	15.24	31.30	27.43	38.10
60	34.27	15.24	20.87	27.43	38.10

ตารางที่ ข. 10 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH จากน้ำทิ้งในระบบ Batch โดยใช้ปริมาณ
ตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	pH	pH	pH	pH	pH
0	5.9	6.5	5.7	5.9	5.3
5	5.9	5.9	3.5	5.9	3.8
10	5.4	5.4	3.3	5.4	3.7
20	5.1	5.1	3.3	5.1	3.5
40	4.7	4.7	3.2	4.7	3.3
60	4.5	4.5	3.2	4.5	3.3

ตารางที่ ข. 11 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH จากน้ำทิ้งในระบบ Batch โดยใช้ปริมาณ
ตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	pH	pH	pH	pH	pH
0	5.9	7.2	6.9	5.9	6.6
5	5.4	7	7.2	5.8	7.2
10	5.4	7.1	7.3	6	7.7
20	5.6	7.1	7.8	6.4	8.2
40	5.8	7.2	8.2	6.7	8.6
60	6	7.3	8.3	7.1	8.8

ตารางที่ ข. 12 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH จากน้ำทิ้งในระบบ Batch โดยใช้ปริมาณ
ตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลาง: ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (นาที)	ตัวกลาง 0.5 g	ตัวกลาง 2 g	ตัวกลาง 5 g	ตัวกลาง 7 g	ตัวกลาง 10 g
	pH	pH	pH	pH	pH
0	5.9	5.9	5.4	5.9	5.9
5	4.6	5.5	5.5	4.6	3.9
10	4.2	5.6	4	4	3.4
20	3.9	4.6	3.4	3.4	3.3
40	3.7	3.6	3.2	3.2	3.1
60	3.7	3.5	3.1	3.2	2.9

การทดลองที่ 3

การศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียด้วยคอลัมน์ตัวกลาง อัตราการไหลรวม 1 BV/hr

ตารางที่ ข. 13 คุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	6.62	48	5
1	6.65	48	5
2	6.63	48	5.2
4	6.60	48	5
6	6.52	48	5.3
24	6.10	41.74	7.1
48	6.29	41.74	7.1
72	6.50	41.74	7.3

ตารางที่ ข. 14 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 1

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	1.49	48	2.6
1	0.10	48	3.5
2	0.02	48	3.7
4	0.04	48	3.9
6	4.18	41.74	5.8
24	5.76	41.74	6.8
48	5.56	41.74	6.6
72	5.68	53.33	6.7

ตารางที่ ข. 15 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 2

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	0.10	48	3.3
1	0.10	48	3.3
2	0.10	48	3.5
4	0.10	48	3.7
6	0.42	41.74	5.5
24	5.56	41.74	6.5
48	5.74	41.74	7.3
72	5.75	53.33	6.7

ตารางที่ ข. 16 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 3

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	0.46	48	3.1
1	0.07	48	3.2
2	0.07	48	3.5
4	0.07	48	3.6
6	0.42	41.74	4.6
24	3.71	41.74	5.5
48	5.36	41.74	7.1
72	5.62	53.33	6.8

ตารางที่ ข. 17 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 4

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	1.33	48	2.8
1	0.48	48	3.1
2	0.40	48	3.4
4	0.04	48	3.6
6	0.42	41.74	4.2
24	0.65	41.74	5.3
48	4.27	41.74	7
72	5.66	53.33	6.7

ตารางที่ ข. 18 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชั้นที่ 1

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	5.78	24	6.5
1	5.76	24	6.7
2	5.79	24	6.5
4	5.76	24	6.4
6	5.76	41.74	6.5
24	6.26	41.74	6.5
48	5.82	41.74	6.5
72	6.17	53.33	6.8

ตารางที่ ข. 19 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชั้นที่ 2

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	5.72	24	6.8
1	5.74	24	6.7
2	5.66	24	6.7
4	5.74	24	7
6	5.56	20.87	7.5
24	6.40	20.87	7
48	5.99	20.87	6.8
72	5.70	26.67	6.9

ตารางที่ ข. 20 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชั้นที่ 3

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	5.72	24	7
1	5.66	24	7.2
2	5.69	24	7
4	5.72	24	7.1
6	5.78	20.87	8
24	6.43	20.87	7.2
48	6.00	20.87	6.9
72	5.44	26.67	7

ตารางที่ ข. 21 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชั้นที่ 4

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	5.71	24	7.1
1	5.72	24	7.3
2	5.74	24	7.2
4	5.74	24	7.3
6	5.78	20.87	8.5
24	6.29	20.87	6.8
48	6.05	20.87	6.9
72	5.41	26.67	7.2

ตารางที่ ข. 22 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 1

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	0.22	41.74	2.8
1	0.23	41.74	3.1
2	0.25	41.74	3.2
4	1.04	41.74	3.4
6	3.08	41.74	5.5
24	5.11	41.74	6.5
48	5.67	41.74	6.9
72	5.66	53.33	7

ตารางที่ ข. 23 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 2

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	0.208	41.74	2.5
1	0.208	41.74	2.8
2	0.179	41.74	3
4	0.61	41.74	3.2
6	0.56	41.74	4.2
24	2.51	41.74	6
48	5.15	41.74	6.6
72	5.35	53.33	6.9

ตารางที่ ข. 24 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 3

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	0.24	20.87	2.5
1	0.23	20.87	2.6
2	0.78	20.87	2.9
4	0.60	20.87	3
6	0.20	41.74	3.6
24	0.38	41.74	5
48	3.62	41.74	6.1
72	4.57	53.33	6.7

ตารางที่ ข. 25 คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ชั้นที่ 4

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน (BV)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัส (mg/l)	COD (mg/l)	pH
0	0.22	20.87	2.8
1	0.24	20.87	2.5
2	0.60	20.87	2.8
4	0.60	20.87	2.9
6	0.20	20.87	3.4
24	0.20	41.74	4.5
48	1.47	41.74	5.3
72	2.60	53.33	5.9

ตารางที่ ข.26 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการใช้งานและหลังการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope)

ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 1)				ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 1)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	4.6	8.14	C	ED	25.14	36.33
O	ED	49.59	65.88	O	ED	41.55	45.07
Al	ED	5.19	4.09	Al	ED	1.38	0.89
Si	ED	13.69	10.36	Si	ED	24.89	15.38
K	ED	6.55	3.56	K	ED	0.53	0.24
Ca	ED	1.5	0.79	Ca	ED	0	0
P	ED	0	0	P	ED	0.28	0.16
Fe	ED	18.89	7.19	Fe	ED	6.23	1.94
Total		100.01	100.01	Total		100	100.01

ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 2)				ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 2)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	1.7	3.35	C	ED	11.93	17.34
O	ED	48.12	71.25	O	ED	60.24	65.75
Al	ED	2.14	1.88	Al	ED	0.65	0.42
Si	ED	5.72	4.82	Si	ED	25.62	15.93
K	ED	0.58	0.35	K	ED	0.12	0.05
Ca	ED	3.83	2.26	Ca	ED	0	0
P	ED	0	0	P	ED	0.2	0.12
Fe	ED	37.92	16.09	Fe	ED	1.25	0.39
Total		100.01	100	Total		100.01	100

ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 3)				ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 3)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	5.37	8.64	C	ED	13.29	20.39
O	ED	54.56	65.86	O	ED	47.81	55.08
Al	ED	7.51	5.38	Al	ED	0.79	0.54
Si	ED	22.29	15.33	Si	ED	34.6	22.7
K	ED	8.25	4.07	K	ED	0.27	0.13
Ca	ED	0.21	0.1	Ca	ED	0	0
P	ED	0	0	P	ED	0.34	0.2
Fe	ED	1.81	0.62	Fe	ED	2.9	0.96
Total		100	100	Total		100	100

ตารางที่ ข.27 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวตัวกลางถ่านกัมมันต์ก่อนการใช้งานและหลังการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope)

ถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 1)				ถ่านกัมมันต์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 1)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	82.96	87.4	C	ED	80.76	85.22
O	ED	15.17	11.99	O	ED	18.15	14.38
K	ED	1.87	0.61	K	ED	0	0
Si	ED	0	0	Si	ED	0.19	0.09
S	ED	0	0	S	ED	0.46	0.18
Ca	ED	0	0	Ca	ED	0.43	0.14
Total		100	100	Total		99.99	100.01

ถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 2)				ถ่านกัมมันต์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 2)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	80.23	84.84	C	ED	78.06	83.03
O	ED	18.62	14.78	O	ED	20.68	16.52
K	ED	1.15	0.37	K	ED	0	0
Si	ED	0	0	Si	ED	0.27	0.12
S	ED	0	0	S	ED	0.17	0.07
Ca	ED	0	0	Ca	ED	0.82	0.26
Total		100	99.99	Total		100	100

ถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 3)				ถ่านกัมมันต์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 3)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	83.81	88.05	C	ED	78.2	82.95
O	ED	14.45	11.39	O	ED	21.06	16.78
K	ED	1.74	0.56	K	ED	0	0
Si	ED	0	0	Si	ED	0.17	0.08
S	ED	0	0	S	ED	0.16	0.06
Ca	ED	0	0	Ca	ED	0.41	0.13
Total		100	100	Total		100	100

ตารางที่ ข.28 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการใช้งาน และหลังการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope)

ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 1)				ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 1)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	30.96	44.04	C	ED	76.41	82.2
O	ED	44.9	47.94	O	ED	21.24	17.15
P	ED	0.69	0.38	P	ED	0.36	0.15
Ca	ED	0	0	Ca	ED	0.42	0.14
Si	ED	0.66	0.4	Si	ED	0	0
S	ED	0.16	0.09	S	ED	0	0
Cl	ED	0.51	0.24	Cl	ED	0	0
K	ED	1.06	0.46	K	ED	0	0
Fe	ED	21.06	6.44	Fe	ED	1.57	0.36
Total		100	99.99	Total		100	100

ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 2)				ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 2)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	48.86	60.03	C	ED	61.07	71.35
O	ED	39.7	36.62	O	ED	29.67	26.02
P	ED	0.42	0.2	P	ED	0.95	0.43
Ca	ED	0	0	Ca	ED	1.08	0.38
Si	ED	0.34	0.18	Si	ED	0	0
S	ED	0.09	0.04	S	ED	0	0
Cl	ED	0.14	0.06	Cl	ED	0	0
K	ED	1.05	0.4	K	ED	0	0
Fe	ED	9.4	2.48	Fe	ED	7.24	1.82
Total		100	100.01	Total		100.01	100

ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนใช้งาน (ตัวอย่าง 3)				ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์หลังใช้งาน (ตัวอย่าง 3)			
Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %	Element	Spectrum Type.	Element %	Atomic %
C	ED	32.6	45.59	C	ED	74.34	80.36
O	ED	44.94	47.18	O	ED	23.47	19.05
P	ED	0.52	0.28	P	ED	0.3	0.13
Ca	ED	0	0	Ca	ED	0.35	0.11
Si	ED	0.33	0.2	Si	ED	0	0
S	ED	0.11	0.06	S	ED	0	0
Cl	ED	0.55	0.26	Cl	ED	0	0
K	ED	1.01	0.43	K	ED	0	0
Fe	ED	19.95	6	Fe	ED	1.54	0.36
Total		100.01	100	Total		100	100.01

ภาคผนวก ค.

ตารางที่ ค. 1 น้ำหนักของมวลตัวกลางทรายและถ่านกัมมันต์เทียบกับเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวของตัวกลางดังกล่าว

	น้ำหนักก่อนเคลือบ (g)	น้ำหนักหลังเคลือบ (g)	น้ำหนักของเหล็ก ออกไซด์ที่เคลือบอยู่ (g)	อัตราส่วนระหว่าง เหล็กออกไซด์กับ ตัวกลาง (g/g)
ถ่านกัมมันต์ (1)	5.0032	5.5716	0.5684	0.102
ถ่านกัมมันต์ (2)	5.0027	5.581	0.5783	0.104
ถ่านกัมมันต์ (3)	5.0067	5.677	0.6703	0.118
เฉลี่ย			0.606	0.108
ทราย (1)	5.0029	5.2142	0.2113	0.041
ทราย (2)	5.0055	5.1764	0.1709	0.033
ทราย (3)	5.0038	5.2031	0.1993	0.038
เฉลี่ย			0.194	0.037

ตารางที่ ค. 2 น้ำหนักของมวลตัวกลางแต่ละชนิดในแต่ละคอลัมน์ที่ใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียด้วยคอลัมน์ตัวกลาง อัตราการไหลรวม 1 BV/hr

คอลัมน์ที่	ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์		ถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์	
	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักเหล็ก ออกไซด์	น้ำหนัก (g)	น้ำหนักรวม (g)	น้ำหนักเหล็ก ออกไซด์
1	85.65	3.16905	42.2	45.64	4.92912
2	85.02	3.14574	41.64	45.54	4.91832
3	85.5	3.1635	37.7	45.69	4.93452
4	85.07	3.14759	38.98	45.53	4.91724

ภาคผนวก ง.

การคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในระบบการทดลองแบบคอลัมน์นั้นกระทำอยู่บนพื้นฐานสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการรั่วไหลของน้ำทิ้งนอกจากน้ำออกจากคอลัมน์ตามท่อกแบบระบบไว้
- 2) ไม่มีการระเหยของสารออกจากระบบ

การคำนวณจะใช้การแบ่งคำนวณเป็นแต่ละช่วงเวลาตามที่ทำการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยพิจารณาจากฟอสฟอรัสที่หายไปจากน้ำทิ้งที่ออกจากระบบที่ทำการวิเคราะห์ในสองช่วงเวลาที่เกี่ยวข้องกันและทำการเฉลี่ยค่าทั้งสองออกมา เมื่อนำแต่ละช่วงเวลามารวมกันก็จะได้ฟอสฟอรัสทั้งหมดที่สะสมในระบบหนึ่งๆ

ตารางที่ ง.1 ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำทั้งหมดในแต่ละช่วงเวลา และปริมาณฟอสฟอรัสสะสมที่เข้าสู่ระบบการทดลอง

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัสในช่วงเวลา (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำ ทั้งหมด (mg)	ฟอสฟอรัสสะสม โดยประมาณ (mg)
1	6.62	1.66	1.66
2	6.65	1.66	3.32
4	6.63	3.29	6.61
6	6.60	3.25	9.86
24	6.52	27.33	37.19
48	6.10	37.57	74.76
72	6.29	38.87	113.63
96	6.50	34.54	148.17

ตาราง ง.2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ HRT 15 นาที ก) ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ข) ถ่านกัมมันต์ ค) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัสสะสม (mg)
1	1.49	1.41	1.41
2	0.10	1.40	2.81
4	0.02	3.16	5.97
6	0.04	3.18	9.15
24	4.17	19.29	28.44
48	5.76	8.63	37.07
72	5.56	4.48	41.55
96	5.68	4.72	46.27

ก คอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัสสะสม (mg)
1	5.78	0.88	0.88
2	5.76	0.16	1.04
4	5.79	0.32	1.35
6	5.76	0.32	1.67
24	5.76	2.91	4.58
48	6.26	2.40	6.98
72	5.82	2.22	9.21
96	6.17	2.49	11.70

ข คอลัมน์ถ่านกัมมันต์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำ ที่ออกจากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัสสะสม (mg)
1	0.22	1.57	1.57
2	0.23	1.54	3.11
4	0.25	3.07	6.18
6	1.04	2.87	9.05
24	3.08	19.49	28.55
48	5.11	13.83	42.37
72	5.670601	6.08	48.45
96	5.66067	4.45	52.90

ค คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ตาราง ง.3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ HRT 30 นาที ก) ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ข) ถ่านกัมมันต์ ค) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ ออกจากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	0.099	1.58	1.58
2	0.099	1.57	3.16
4	0.099	3.14	6.30
6	0.099	3.14	9.44
24	0.42	27.57	37.01
48	5.56	20.44	57.46
72	5.74	4.54	61.99
96	5.75	3.974	65.97

ก คอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออก จากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	5.72	0.88	0.88
2	5.74	0.17	1.05
4	5.66	0.35	1.41
6	5.74	0.35	1.76
24	5.56	3.40	5.16
48	6.40	2.58	7.74
72	5.99	1.30	9.05
96	5.70	3.38	12.43

ข คอลัมน์ถ่านกัมมันต์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออก จากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	0.21	1.57	1.57
2	0.21	1.54	3.11
4	0.18	3.10	6.21
6	0.61	3.00	9.21
24	0.56	26.13	35.33
48	2.51	29.14	64.47
72	5.15	15.40	79.87
96	5.35	6.91	86.78

ค คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ตาราง ง.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ HRT 45 นาที ก) ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ข) ถ่านกัมมันต์ ค) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัสสะสม (mg)
1	0.457	1.54	1.54
2	0.07	1.53	3.07
4	0.07	3.16	6.23
6	0.07	3.16	9.39
24	0.42	27.64	37.02
48	3.71	25.96	62.99
72	5.36	11.18	74.17
96	5.62	5.49	79.66

ก คอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัสสะสม (mg)
1	5.72	0.88	0.88
2	5.66	0.18	1.06
4	5.69	0.37	1.43
6	5.72	0.35	1.78
24	5.78	2.96	4.74
48	6.43	1.84	6.58
72	5.60	1.18	7.76
96	5.44	4.12	11.88

ข คอลัมน์ถ่านกัมมันต์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออก จากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	0.24	1.57	1.57
2	0.23	1.54	3.10
4	0.78	2.94	6.04
6	0.60	2.85	8.89
24	0.20	26.95	35.84
48	0.38	36.59	72.43
72	3.62	26.35	98.78
96	4.57	13.83	112.60

ค คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ตาราง ง.5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ HRT 60 นาที ก) ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ข) ถ่านกัมมันต์ ค) ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออก จากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	1.33	1.43	1.43
2	0.477	1.37	2.80
4	0.40	2.98	5.78
6	0.04	3.08	8.86
24	0.42	27.71	36.57
48	0.65	35.13	71.70
72	4.27	23.62	95.31
96	5.66	8.63	103.95

ก คอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออก จากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	5.71	0.89	0.89
2	5.72	0.17	1.06
4	5.74	0.34	1.40
6	5.74	0.33	1.73
24	5.78	2.91	4.64
48	6.29	2.25	6.90
72	6.05	1.45	8.35
96	5.41	4.06	12.41

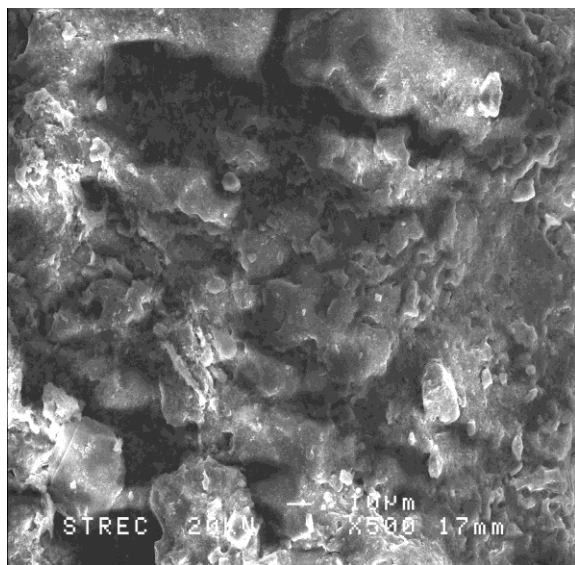
ข คอลัมน์ถ่านกัมมันต์

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (BV โดย 1 BV = 249 ml)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ออก จากคอลัมน์ (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ หายไปจากน้ำ (mg)	ฟอสฟอรัส สะสม (mg)
1	0.22	1.57	1.57
2	0.24	1.54	3.11
4	0.60	2.98	6.09
6	0.60	2.90	8.99
24	0.20	26.95	35.94
48	0.20	37.12	73.06
72	1.47	33.32	106.38
96	2.60	26.14	132.52

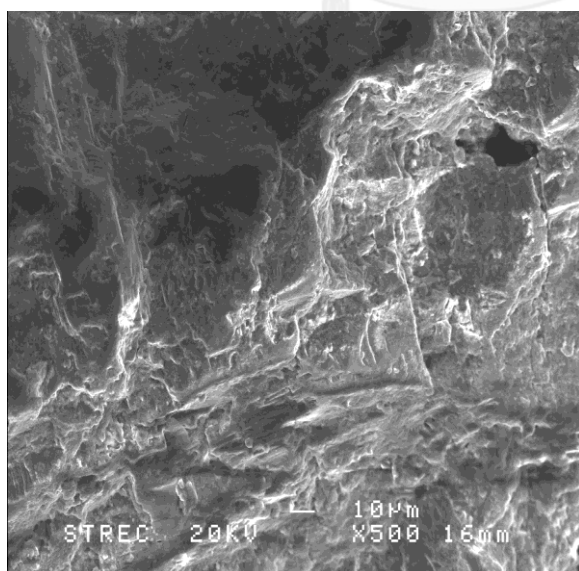
ค คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์

ภาคผนวก จ.

จ.1) รูปถ่ายพื้นผิวตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนเริ่มการทดลอง ก) และหลังทำการทดลองแล้ว ข)

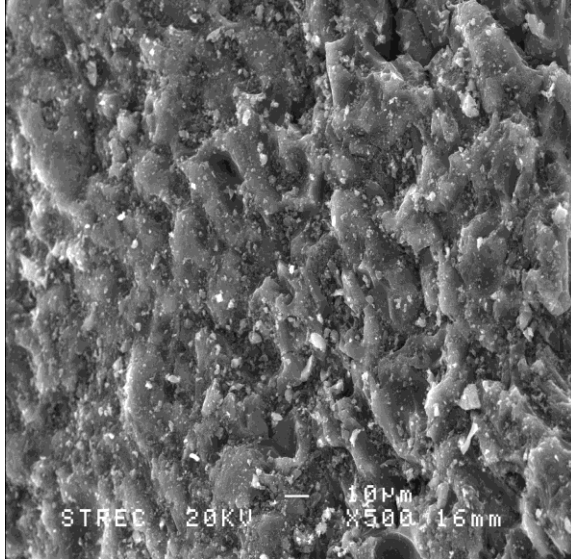


ก)

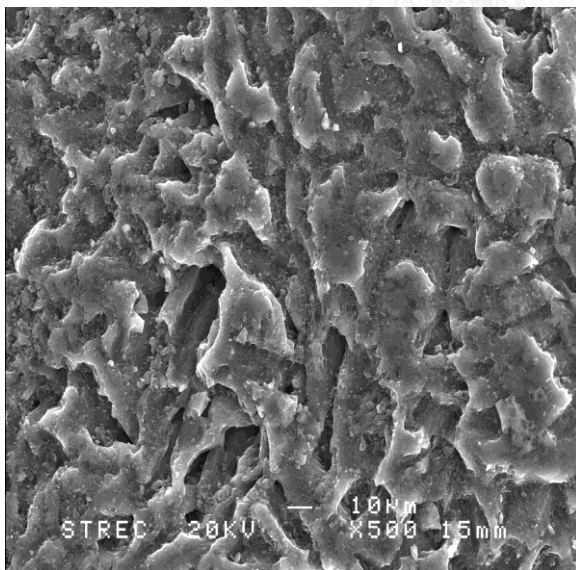


ข)

จ.2) รูปถ่ายพื้นผิวตัวกลางถ่านกัมมันต์ก่อนเริ่มการทดลอง ก) และหลังทำการทดลองแล้ว ข)

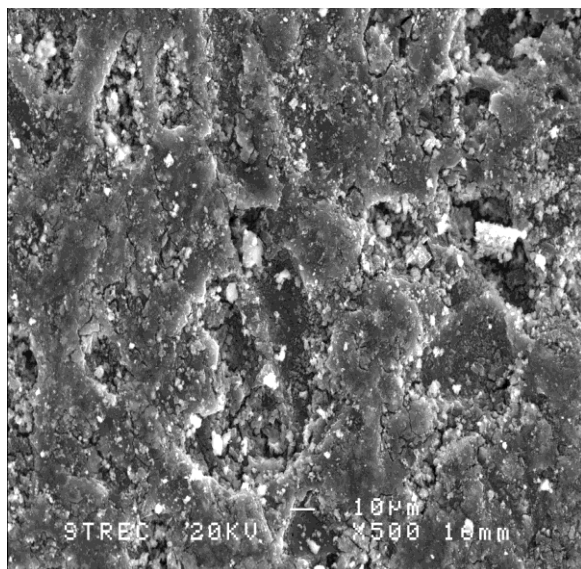


ก)

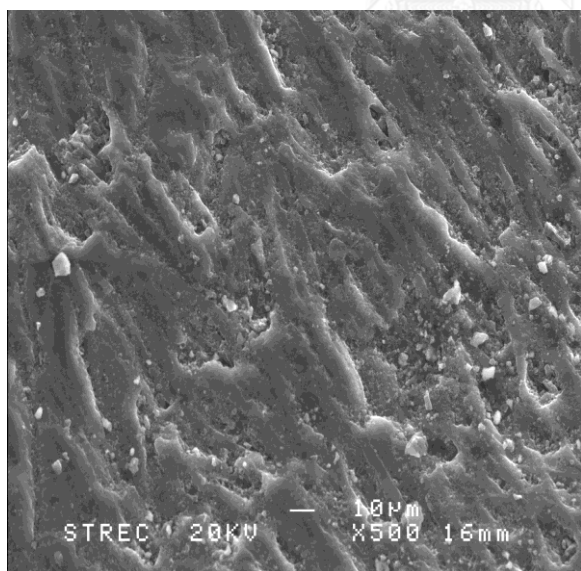


ข)

จ.3) รูปถ่ายพื้นผิวตัวกลางถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนเริ่มการทดลอง ก) และหลังทำการทดลองแล้ว ข)



ก)



ข)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมาชัย ณีรัฐกฤษกร เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2547 และศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2554





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY