

การดูฉบับสารกลุ่มยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย
MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF NONSTEROIDAL ANTI-INFLAMMATORY DRUGS IN THE PRESENCE OF
DISSOLVED ORGANIC MATTER BY FUNCTIONALIZED MIL-53(A)



Miss Natthawadee Chantanavorakunchai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับสารกลุ่มยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI) ที่มีการดัด แปรหมู่ฟังก์ชัน
โดย	น.ส.ณัฐวดี ฉันทนาวรกุลชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ชลิตา รัตนเทวะเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟิงรัศมี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ชลิตา รัตนเทวะเนตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พนิดา ปรารัตน์)

ณัฐวดี ฉันทนาวารกุลชัย : การดูดซับสารกลุ่มยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ร่วมกับ
 สารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน. (ADSORPTION OF
 NONSTEROIDAL ANTI-INFLAMMATORY DRUGS IN THE PRESENCE OF DISSOLVED
 ORGANIC MATTER BY FUNCTIONALIZED MIL-53(AI)) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ปฎิภาณ
 ปัญญาพลกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชลิตา รัตนเทวะเนตร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของ MIL-53 (AI) และ MIL-53 (AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน (NH_2) ในการดูดซับคีโตโพรเฟน (KET) นาพรอกเซน (NPX) และไอบูโพรเฟน (IBP) อีกทั้งศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของตัวกลางดูดซับ และประเมินผลของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM) ทั้งชนิดชอบน้ำ (HPI) และไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการดูดซับ ผลการทดลองจลพลศาสตร์การดูดซับพบว่าสมการอันดับที่ 2 เสมือนสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด สำหรับ MIL-53(AI) เกิดการดูดซับยาอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรก และเข้าสู่สมดุลภายใน 75 นาที ซึ่งมีความเร็วในการดูดซับมากกว่า PAC การดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนไม่พบการดูดซับซึ่งเป็นผลกระทบจากฟอสเฟตบัพเฟอร์ ไอโซเทอมการดูดซับ KET, NPX, และ IBP ของ MIL-53(AI) ที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับสมการชิปส์, เส้นตรง, และแลงเมียร์ ตามลำดับ โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับเป็น 2 เท่าของ PAC ในการดูดซับแบบคัดเลือกในมลสารผสมของ MIL-53(AI) มีความสามารถลดอาจเกิดจากการแย่งพื้นที่การดูดซับซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดโมเลกุลของยา MIL-53(AI) และ NH_2 -MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาเพิ่มขึ้นในน้ำเสียจริงเนื่องจากปรากฏการณ์ Breathing effect เมื่ออยู่ในสารละลายอินทรีย์ และผลกระทบของฟอสเฟตที่ลดลง จากการศึกษาผลกระทบของ DOM ต่อการดูดซับ KET, NPX, และ IBP แบบมลสารเดี่ยวแสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของ DOM, HPI, และ HPO ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับ KET สูงขึ้น แต่การดูดซับ NPX และ IBP ลดลงหรือไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจาก HPO และ HPI สามารถเกิดปฏิกิริยากับ NPX และ IBP ได้ ทำให้เกิดการแข่งขันระหว่าง HPO หรือ HPI และตัวกลางดูดซับในการดูดซับยา ในกรณีมลสารยาแบบผสม การมีอยู่ของ DOM และ HPI นั้นทำให้ความสามารถในการดูดซับยาลดลงจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับ แต่ในกรณีการมีอยู่ของ HPO ในมลสารยาแบบผสม พบว่าความสามารถในการดูดซับของ MIL-53(AI) ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในกรณี MIL-53(AI) ที่ต่อติดหมู่เอมีนมีการดูดซับลดลงเนื่องจากหมู่เอมีน อาจเกิดการบดบังรูพรุนบนตัวกลางดูดซับ

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970163321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Adsorption, Metal organic framework, Pharmaceutical residues, Amine functional group, NSAIDs

Natthawadee Chantanavorakunchai : ADSORPTION OF NONSTEROIDAL ANTI-INFLAMMATORY DRUGS IN THE PRESENCE OF DISSOLVED ORGANIC MATTER BY FUNCTIONALIZED MIL-53(AI). Advisor: Assoc. Prof. Patiparn Punyapalukul, Ph.D. Co-advisor: Chalita Ratanatawanate, Ph.D.

This study investigated adsorption efficiencies of MIL-53(AI) and amine NH_2 functionalized MIL-53 (AI) (NH_2 -MIL-53 (AI)) for removal of ketoprofen (KET) Naproxen (NPX) and ibuprofen (IBP). Selective adsorption and the effects of dissolved organic matter (DOM) hydrophilic DOM (HPI) and hydrophobic DOM (HPO) were evaluated. The adsorption kinetics of MIL-53(AI) were fitted with the pseudo-second-order equation. The Pharmaceuticals (PPCPs) can be adsorbed rapidly within 30 minutes, faster than PAC, and reach equilibrium within 75 min. The NH_2 -MIL-53 (AI) could not adsorb PPCPs due to the interference of phosphate. Adsorption isotherm of KET, NPX, and IBP on MIL-53(AI) had higher capacity than PAC and can be fitted with the Sip, linear, and Langmuir model, respectively. In mixed solute, adsorption capacities of PPCPs on MIL-53 (AI) were decreased which might be caused by competition for adsorption site, related to the molecular size of PPCPs. In wastewater, the adsorption capacity of PPCPs on MIL-53 (AI) and NH_2 -MIL-53 (AI) was increased compared with synthetic wastewater due to the increase of breathing effect and decrease of effect from phosphate buffer. Effects of DOM on the adsorption of KET, NPX, and IBP in a single solution were investigated. The adsorption capacity of KET was increased with the presence of DOM, HPI, and HPO; however, the adsorption capacity of NPX and IBP was decreased and/or unchanged which might relate to the interaction of HPO (or HPI) and NPX (or IBP) in solution. In the case of mixed PPCPs with DOM or HPI, the adsorption capacity of PPCPs was decreased due to competition for adsorption sites. The presence of HPO in mixed solution did not show a significant change of the adsorption capacity of three PPCPs on MIL-53 (AI). In case NH_2 -MIL-53(AI), adsorption capacities of three PPCPs were decreased due to pore blocking by NH_2 .

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2018 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยพระคุณของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ชลิตา รัตนเทวะเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาสละเวลาแนะนำ ให้คำปรึกษา และ ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ และ คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธ์ อ.ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และ ดร.พินิตา ปรารัตน์ ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้และได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการวัสดุวิศวกรรมนาโนเพื่อสิ่งแวดล้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอบพระคุณอาจารย์รามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณดุจเดือน สมพลอยไพลิน และ คุณชลิตา อิมหาร สำหรับข้อเสนอแนะและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณคุณพิเชฐ เตวรานนท์ และเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ณัฐวดี ฉันทนาวารกุลชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.3.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ.....	4
1.3.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	4
1.3.3 การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	4
1.3.4 การศึกษากระบวนการดูดซับของซีโตนีโพรเพน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนบน ตัวกลางดูดซับ.....	4
1.3.4.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	5
1.3.4.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์.....	5
1.3.4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำในน้ำเสียสังเคราะห์.....	5
1.3.4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ ความเข้มข้นสูง.....	5
1.3.4.5 การศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM) ที่มีผลต่อการดูดซับ... ..	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 สารตกค้างจากยาในสิ่งแวดล้อม.....	8
2.2 ยาแก้ปวดและยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ (Non-steroidal anti-inflammatory drugs: NSAIDs).....	11
2.3 คีโตโพรเฟน (Ketoprofen: KET).....	13
2.4 นาพรอกเซน (Naproxen: NPX)	14
2.5 ไอบูโพรเฟน (Ibuprofen: IBU).....	15
2.6 การกำจัดสารตกค้างจากยา.....	19
2.6.1 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยระบบบำบัดน้ำเสีย	19
2.6.2 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation–Flocculation).....	21
2.6.3 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOP)	21
2.6.4 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการเมมเบรน (Membrane).....	22
2.6.5 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการย่อยสลายโดยใช้แสง (Photo-degradation).....	22
2.6.6 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	23
2.7 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter: DOM).....	23
2.7.1 สารฮิวมิก.....	24
2.7.2 ดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ธรรมชาติ.....	25
2.7.2.1 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC).....	26
2.7.2.2 Fluorescence Excitation - Emission fluorescence (FEEM).....	26
2.8 กระบวนการแยก (Fractionation) ชนิดของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยเรซิน.....	26
2.9 โครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่มีรูพรุน.....	27
2.9.1 MIL-53(Al).....	28
2.9.2 ปรากฏการณ์การหายใจ (Breathing effect).....	29

2.10 หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups).....	30
2.10.1 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ	31
2.10.1.1 การต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (Post-synthetic grafting).....	31
2.10.1.2 การควบแน่นร่วม (Co-condensation or Direct synthesize).....	31
2.10.2 หมู่ฟังก์ชันเอมีน (Amine).....	31
2.11 การดูดซับ (Adsorption).....	32
2.11.1 ทฤษฎีการดูดซับ.....	32
2.11.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	33
2.11.3 ขั้นตอนของการดูดซับ	35
2.11.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption).....	36
2.11.4.1 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic).....	36
2.11.4.2 จลนพลศาสตร์อันดับที่สองเสมือน (Pseudo second order kinetic).....	37
2.11.4.3 กลไกการดูดซับ.....	38
2.11.5 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	38
2.11.5.1 ไอโซเทอมแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm).....	41
2.11.5.2 ไอโซเทอมฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm).....	43
2.11.5.3 ไอโซเทอมซิปส์ (Sips Isotherm).....	44
2.11.5.4 ไอโซเทอมเรดลิชและปีเตอร์สัน (Redlich and Peterson Isotherm).....	44
2.12 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	45
2.12.1 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยโครงข่ายโลหะอินทรีย์.....	45
2.12.2 การใช้โครงข่ายโลหะอินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับในวัฏภาคน้ำ.....	45
2.12.3 การดัดแปรหมู่ฟังก์ชันของโครงข่ายโลหะอินทรีย์	46
2.12.4 การกำจัดสารตกค้างจากร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	47
2.13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 การเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย	50
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	50
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	51
3.2 การดำเนินการวิจัย.....	52
3.2.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ MIL-53(Al) และ MIL-53(Al) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน เอมีน (NH ₂ -MIL-53(Al))	52
3.2.1.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ MIL-53(Al)	52
3.2.1.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ NH ₂ -MIL-53(Al).....	52
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวกลางดูดซับ MIL-53 และ NH ₂ -MIL- 53(Al)	53
3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	54
3.2.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	54
3.2.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	54
3.2.2.4 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว	54
3.2.2.5 การศึกษาลักษณะสัญญาณของตัวกลางดูดซับ	54
3.2.2.6 การศึกษาประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pzc).....	54
3.2.3 การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM)	55
3.2.3.1 การเก็บน้ำตัวอย่าง.....	55
3.2.3.2 ขั้นตอนการเตรียมเรซินสำหรับกระบวนการ Resin Fractionation.....	55
3.2.3.3 ขั้นตอนการบรรจุเรซิน DAX-8.....	56
3.2.3.4 ขั้นตอนการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการ Resin Fractionation	56
3.2.3.5 ขั้นตอนการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการระเหยแห้ง (Evaporation).....	58

3.2.4 การศึกษากระบวนการดูดซับ.....	59
3.2.4.1 การเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock solution)	59
3.2.4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	59
3.2.4.3 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์	60
3.2.4.4 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำในน้ำเสียสังเคราะห์	61
3.2.4.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ ความเข้มข้นสูง	62
3.2.5 การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยา ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	63
3.2.5.1 การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	63
3.2.5.2 การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	64
3.2.6 วิธีการวิเคราะห์	65
3.2.6.1 การการตรวจวิเคราะห์ปริมาณยาในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ	65
3.2.6.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณยาในสารละลาย	65
3.2.6.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ	66
3.2.6.4 การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำ	66
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	67
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	67
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	67
4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	69
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ.....	72
4.1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ	73
4.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ	74
4.1.6 การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ	78

4.2 การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM).....	79
4.2.1 การเก็บน้ำตัวอย่าง	79
4.2.2 กระบวนการแยกประเภทสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเรซิน (กระบวนการแฟรกชันด้วยเรซิน) (Resin Fractionation)	79
4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	86
4.3.1 การทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ	86
4.3.1.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับของ MIL-53(Al).....	86
4.3.1.2 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันเอมีนบน MIL-53(Al).....	87
4.3.1.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับของ PAC.....	87
4.3.2 กลไกการแพร่ภายในอนุภาค.....	91
4.3.2.1 การแพร่ภายในรูพรุนของ MIL-53(Al) และ PAC.....	91
4.4 ไอโซเทอมการดูดซับ	94
4.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับยาที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์.....	94
4.4.1.1 ผลกระทบของการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนบน MIL-53(Al)	94
4.4.1.2 ไอโซเทอมการดูดซับของ PAC	95
4.4.2 การดูดซับแบบคัดเลือก	101
4.4.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูง.....	101
4.4.3 การดูดซับสารตกค้างจากยาร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	104
4.4.3.1 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำต่อการดูดซับ.....	104
4.4.3.1.1 การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (DOM) ของตัวกลางดูดซับ.....	104
4.4.3.1.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (DOM) ต่อการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยว.....	105

4.4.3.1.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (DOM) ต่อการดูดซับ สารตกค้างจากยาแบบมลสารผสม.....	108
4.4.3.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการดูดซับ สาร ตกค้างจากยา.....	110
4.4.3.2.1 การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO)	110
4.4.3.2.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการ ดูดซับ สารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยว.....	111
4.4.3.2.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการ ดูดซับ สารตกค้างจากยาแบบมลสารผสม.....	114
4.4.3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) ต่อการดูดซับสาร ตกค้างจากยา.....	116
4.4.3.3.1 การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) โดยตัวกลางดูด ซับ.....	116
4.4.3.3.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) ต่อการดูด ซับ สารตกค้างทางยาแบบมลสารเดี่ยว.....	117
4.4.3.3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) ต่อการดูด ซับ สารตกค้างจากยาแบบมลสารผสม	121
4.4.4 การดูดซับสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่ำ	125
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	127
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	127
5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	127
5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	127
5.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ	128
5.1.4 การศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบยามลสารผสม	128
5.1.5 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารยาเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	128
5.1.6 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	129

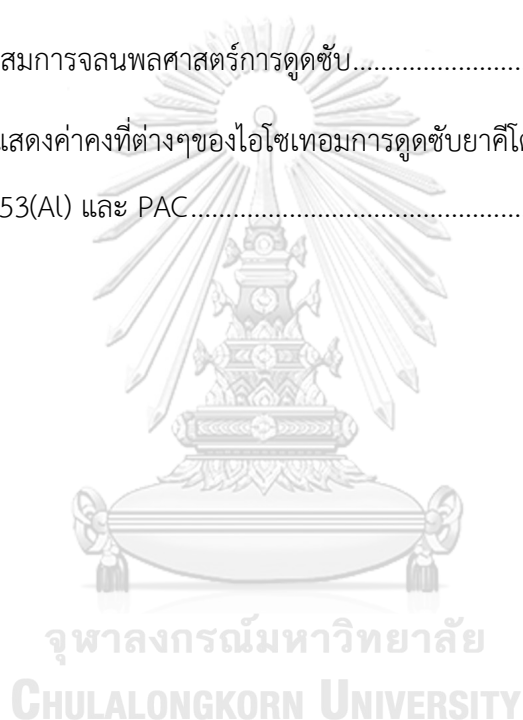
5.1.7 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิด ไม่ชอบ น้ำ.....	129
5.1.8 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิด ไม่ชอบ น้ำ.....	130
5.1.9 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ ชนิดชอบน้ำ	130
5.1.10 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ	130
5.1.11 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยวในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่ำ	131
5.2 ข้อเสนอแนะ	131
ภาคผนวก.....	132
ภาคผนวก ก.....	133
ภาคผนวก ข.....	146
ภาคผนวก ค.....	150
รายการอ้างอิง.....	174
บรรณานุกรม.....	175
ประวัติผู้เขียน.....	193

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2- 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน.....	12
ตารางที่ 2- 2 ข้อมูลความเป็นพิษของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน	16
ตารางที่ 2- 3 ปริมาณคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่ตรวจพบในประเทศไทย.....	17
ตารางที่ 2- 4 ปริมาณสารตกค้างจากยาที่พบในน้ำผิวดินแต่ละประเทศของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน.....	18
ตารางที่ 2- 5 ปริมาณสารตกค้างจากยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่พบในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล.....	19
ตารางที่ 2- 6 แสดงปริมาณคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่มีการตรวจพบในน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย CAS	20
ตารางที่ 2- 7 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก	25
ตารางที่ 2- 8 คุณสมบัติทั่วไปของหมู่ฟังก์ชันเอมีน.....	32
ตารางที่ 3- 1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	50
ตารางที่ 3- 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	53
ตารางที่ 3- 3 พารามิเตอร์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	59
ตารางที่ 3- 4 พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลายสูง.....	60
ตารางที่ 3- 5 พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลายต่ำ.....	61
ตารางที่ 3- 6 พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูง	62
ตารางที่ 3- 7 พารามิเตอร์การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับ DOM.....	63
ตารางที่ 3- 8 พารามิเตอร์การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับ DOM.....	64

ตารางที่ 4- 1	พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของ MIL-53(AI) และ NH ₂ -MIL-53(AI) ..	71
ตารางที่ 4- 2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ด้วยเครื่อง Series II CHN S/O Analyzer 2400.....	74
ตารางที่ 4- 3	ลักษณะน้ำเสียตัวอย่าง.....	79
ตารางที่ 4- 4	ตำแหน่งของ peak ของสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	82
ตารางที่ 4- 5	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน.	90
ตารางที่ 4- 6	ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	93
ตารางที่ 4- 7	ตารางแสดงค่าคงที่ต่างๆของไอโซเทอมการดูดซับยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนโดย MIL-53(AI) และ PAC.....	99



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1- 1	แผนภาพแสดงกรอบการทำงานวิจัย	7
รูปที่ 2- 1	แหล่งกำเนิดและการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของยา.....	10
รูปที่ 2- 2	การสังเคราะห์ MIL-53 (Al) ที่อุณหภูมิห้อง	29
รูปที่ 2- 3	ปรากฏการณ์การหายใจ (Breathing effect) ของ MIL-53(Al)	30
รูปที่ 2- 4	ไอโซเทอมการดูดซับแบบต่างๆ	40
รูปที่ 2- 5	กราฟแสดงไอโซเทอมแลงเมียร์	42
รูปที่ 2- 6	กราฟแสดงไอโซเทอมฟรุนดลิช	43
รูปที่ 3- 1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษาคุณลักษณะของน้ำทิ้งทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะของสารอินทรีย์	57
รูปที่ 3- 2	เครื่องระเหยสารแบบหมุน	58
รูปที่ 4- 1	ผลการวิเคราะห์ XRD ของ MIL-53(Al) และ NH ₂ -MIL-53(Al) ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเปรียบเทียบกับ XRD Simulation ของ MIL-53(Al).....	68
รูปที่ 4- 2	ผลการวิเคราะห์ XRD ของ NH ₂ -MIL-53(Al) ของ Li และคณะ (2015).....	68
รูปที่ 4- 3	ผลการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซไนโตรเจน MIL-53(Al) (บน) และ NH ₂ -MIL-53(Al) (ล่าง) 70	
รูปที่ 4- 4	กราฟไอโซเทอมตาม IUPAC	71
รูปที่ 4- 5	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ MIL-53(Al) และ NH ₂ -MIL-53(Al) โดย FT-IR spectra.....	72
รูปที่ 4- 6	ภาพขยายพื้นผิวของ MIL-53(Al) (บน) และ NH ₂ -MIL-53(Al) (ล่าง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150,000 เท่า.....	75

รูปที่ 4- 7 ภาพขยายพื้นผิวของ MIL-53(AI) (บน) และ NH ₂ -MIL-53(AI) (ล่าง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 100,000 เท่า.....	76
รูปที่ 4- 8 ภาพขยายพื้นผิวของ MIL-53(AI) (บน) และ NH ₂ -MIL-53(AI) (ล่าง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150,000 เท่า.....	77
รูปที่ 4- 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Zeta potential และ pH ของ MIL-53(AI).....	78
รูปที่ 4- 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Zeta potential และ pH ของ NH ₂ -MIL-53(AI).....	78
รูปที่ 4- 11 แสดงตำแหน่งและสมบัติทั่วไปของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEEM	81
รูปที่ 4- 12 คุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ของน้ำเสียตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแปรรักษา	81
รูปที่ 4- 13 คุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแปรรักษา	83
รูปที่ 4- 14 แผนภูมิแท่งแสดงความเข้มแสงฟลูออเรสเซนส์ที่ตรวจพบของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านกระบวนการแปรรักษา.....	84
รูปที่ 4- 15 คุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการระเหย	85
รูปที่ 4- 16 จลนพลศาสตร์การดูดซับคีโตโพรเฟนบน MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	88
รูปที่ 4- 17 จลนพลศาสตร์การดูดซับนาพรอกเซนบน MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	88
รูปที่ 4- 18 จลนพลศาสตร์การดูดซับไอบูโพรเฟนบน MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	88
รูปที่ 4- 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับยาคีโตโพรเฟน โดย MIL-53(AI) และ PAC	89
รูปที่ 4- 20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับยานาพรอกเซน โดย MIL-53(AI) และ PAC	89

รูปที่ 4- 21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับยาไอบูโพรเฟน โดย MIL-53(AI) และ PAC	89
รูปที่ 4- 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับและเวลา ^{1/2} ของการดูดซับ คีโตโพรเฟน นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนโดย MIL-53(AI) และ PAC	92
รูปที่ 4- 23 ขนาดโมเลกุลยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน	93
รูปที่ 4- 24 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับของยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC	97
รูปที่ 4- 25 กราฟแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟน (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI) และ PAC (ซ้ายและขวาตามลำดับ)	98
รูปที่ 4- 26 กลไกการดูดซับที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนกับ MIL-53(AI)	100
รูปที่ 4- 27 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสม โดย MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC (ตามลำดับ)	102
รูปที่ 4- 28 ปรากฏการณ์ Breathing effect ของ MIL-53(AI) (บน) และ NH ₂ -MIL-53(AI) (ล่าง)	103
รูปที่ 4- 29 ความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารอินทรีย์ละลายน้ำจากการเปรียบเทียบการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำของตัวกลางดูดซับต่างๆ	105
รูปที่ 4- 30 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนระหว่างร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำและในสารละลายบัฟเฟอร์ (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC	107
รูปที่ 4- 31 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI), NH ₂ -MIL-53(AI), และ PAC (ตามลำดับ)	109

หน้า

รูปที่ 4- 32 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC 110

รูปที่ 4- 33 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของยาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนระหว่างร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) และในสารละลายบัฟเฟอร์ (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC..... 113

รูปที่ 4- 34 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC (ตามลำดับ) 115

รูปที่ 4- 35 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC 116

รูปที่ 4- 36 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของยาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนระหว่างร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำและในสารละลายบัฟเฟอร์ (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC..... 119

รูปที่ 4- 37 แผนภูมิแท่งความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ชอบน้ำร่วมกับยามลสารเดี่ยวที่ดูดซับโดย PAC..... 120

รูปที่ 4- 38 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC (ตามลำดับ) 122

รูปที่ 4- 39 แผนภูมิแท่งความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ชอบน้ำร่วมกับยามลสารผสมที่ดูดซับโดย PAC..... 123

รูปที่ 4- 40 กลไกการดูดซับที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการดูดซับสารตกค้างจากยาร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI) (บน) และ PAC (ล่าง)..... 124

รูปที่ 4- 41 ไอโซเทอมการดูดซับยาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน(ตามลำดับ) ที่ความเข้มข้นต่ำโดย MIL-53(AI) 126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยาเป็นหนึ่งในปัจจัยสี่ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในปัจจุบันมีการใช้ยาอย่างแพร่หลาย และมีการบริโภคปริมาณมากตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร เพื่อใช้ในการป้องกันและรักษาโรคในมนุษย์ นอกจากจะมีการใช้ยาในมนุษย์แล้วยังมีการใช้ยาในสัตว์ เช่น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ฟาร์มสุกร ภายหลังการบริโภคยาโดยส่วนมากยารักษาโรคไม่สามารถสลาย (Metabolism) ในร่างกายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งร่างกายจะทำการกำจัดออกจากร่างกายโดยขับถ่ายออกมาทางอุจจาระ และปัสสาวะ นอกจากนั้นแล้วยังมีการทิ้งยาที่ไม่ถูกต้องเช่น การทิ้งยาที่ไม่ได้ใช้หรือหมดอายุในขยะชักโครก หรือวางระบายน้ำ รวมถึงน้ำเสียจากโรงพยาบาล และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทำให้เกิดการปล่อยของเสียออกมาในรูปของตัวยาเดิมหรือมีการเปลี่ยนรูปของยาตัวเดิมซึ่งบางครั้งอาจมีความเป็นพิษมากกว่าเดิม หรือเป็นสารที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมซึ่งได้ทำให้สารตกค้างจากยามีการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีการพบสารตกค้างจากยาที่ปนเปื้อนในธรรมชาติ ในน้ำผิวดิน และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย หรือแม้แต่ในน้ำประปาและน้ำดื่มในปริมาณความเข้มข้นต่ำในหน่วยนาโนกรัมจนถึงระดับไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งสารตกค้างจากยาจัดเป็นสารมลพิษอุบัติใหม่ (Emerging pollutant) (US.EPA, 2005) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะไม่ส่งผลต่อร่างกายมนุษย์โดยตรง แต่ปัญหาที่สำคัญคือ สารตกค้างจากยามีผลกระทบต่อระบบนิเวศ และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศนั้น ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อกลับมายังมนุษย์ได้ เนื่องจากยาที่ถูกกำจัดยังคงมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา และมีความคงทนในสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างผลกระทบที่เกิดจากสารตกค้างจากยาต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศที่ถูกรายงาน ได้แก่ การตายลงของนกแครงจำนวนมาก การเปลี่ยนเพศและการแสดงออกของลักษณะทางเพศในลูกปลาบริเวณใกล้จุดปล่อยน้ำเสียเกิดการกลายพันธุ์ เมื่อมีการได้รับสัมผัสทำให้เกิดกระบวนการสะสมของยาในร่างกายของสิ่งมีชีวิต (Bioaccumulation) โดยเฉพาะสัตว์น้ำเพื่อการบริโภค เช่น กุ้ง หอย ปู และปลา มีสาเหตุมาจาก

สารตกค้างจากยาในแหล่งน้ำ หรือการรับประทานอาหารที่ปรุงจากสัตว์น้ำเหล่านี้ทำให้มนุษย์ได้รับสารตกค้างจากยาที่ไม่พึงประสงค์ได้ (บรมพจน์ พฤตวินาสันต์ และลีณา สุนทรสุข, 2558)

ยาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน จัดเป็นยาในกลุ่มยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ (Non-steroidal antiinflammatory drugs: NSAIDs) เป็นยาที่มีผลข้างเคียงคล้ายฮอร์โมน (Endocrine disrupted compounds) (พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์, 2556) ซึ่งเป็นกลุ่มยาที่มีการใช้ และพบในสิ่งแวดล้อมทางน้ำและน้ำเสียปริมาณมากที่สุด เป็นยาที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อม และจัดอยู่ในสารกำจัดได้ยากถึงกำจัดได้ปานกลาง (Gagnon และ Lajeunesse, 2008; Jiang, Zhou, และSharma, 2013) เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบทั่วไปในปัจจุบันนั้นไม่ได้ถูกออกแบบสำหรับกำจัดมลสารที่มีขนาดเล็ก (Micropollutant) หรือสารตกค้างจากยาจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ และมีการพบปริมาณสารตกค้างจากยาในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นในประเทศไทย (Tewari และคณะ, 2013; วาลิกา เศวตโยธิน และคณะ, 2559) หรือในต่างประเทศ (Bagheri, Afkhamib, และNoroozic, 2016) อีกทั้งมีการพบยาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในแม่น้ำสายหลักของไทย และน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาแล้ว (Tewari และคณะ, 2013) ในปัจจุบันมีการศึกษากระบวนการต่างๆเพื่อนำมาใช้เพื่อกำจัดสารตกค้างจากยา เช่น การใช้เมมเบรน การย่อยสลายโดยใช้แสง กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) และกระบวนการทางชีวภาพ จากการศึกษาโดยงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ แต่เป็นวิธีที่ใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังทำให้เกิดสารพลอยได้ (By product) ที่เป็นพิษซึ่งอาจมีความเป็นพิษมากกว่าสารเดิม (Hasan, Khan, และJhung, 2016) โดยวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพที่ดี ง่ายต่อการออกแบบ การดำเนินการระบบสามารถทำได้ง่าย และใช้พลังงานน้อย ซึ่งประสิทธิภาพของการดูดซับสารตกค้างจากยาโดยตัวกลางดูดซับพื้นฐานคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารตกค้างจากยาที่ค่อนข้างต่ำ และไม่มี ความจำเพาะต่อมลสาร โดยวัสดุดูดซับที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากได้แก่ วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (MOFs) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนสูง สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพเคมีได้ง่าย เช่นการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน (Functionalized) เพื่อให้มีความจำเพาะต่อการดูดซับมากขึ้น จึงมีการนำ MOFs มาเป็นวัสดุดูดซับทั้งในสถานะแก๊ส และในสถานะของเหลว ซึ่ง MIL-53(AI) เป็นหนึ่งในชนิดของ MOFs ที่มีความเสถียรเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว และ

สภาวะอุณหภูมิสูง ส่วนโลหะในโครงสร้างของ MIL-53(AI) ได้แก่ลูมิเนียมซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าโลหะของ MOFs ชนิดอื่นๆ และมีสมบัติสำคัญคือ Breathing effect (Rallapalli และคณะ, 2010; Zhou และคณะ, 2013; Qian และคณะ, 2013) ที่สามารถปรับขนาดของรูพรุนให้เหมาะสมต่อการดูดซับของมลสารได้

ในการดูดซับสารตกค้างจากยาในน้ำนั้น ตามความเป็นจริงพบว่ามิมลสารอื่นๆอยู่ร่วมด้วยเป็นจำนวนมาก เช่น ในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดยังคงมีสารอินทรีย์ละลายน้ำอื่นๆคงเหลือปะปนอยู่ด้วย ซึ่งอาจจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่จำเพาะเจาะจงกับสารตกค้างจากยา เนื่องจากการมีอยู่ของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM) โดยเฉพาะส่วนที่มีมวลโมเลกุลต่ำมีความเป็นไปได้ในการยับยั้งการดูดซับสารตกค้างจากยา (Luo และคณะ, 2014) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นจะกำจัดสารตกค้างจากยาในกลุ่มยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ ได้แก่ คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน โดยกระบวนการดูดซับที่ใช้วัสดุโครงข่ายอินทรีย์ชนิด MIL-53(AI) เป็นตัวกลางดูดซับ และตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน รวมถึงศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำต่อการดูดซับสารตกค้างจากยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของ MIL-53 (AI) และ MIL-53 (AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน (NH_2) ในการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

1.2.2 เพื่อศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของตัวกลางดูดซับในการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

1.2.3 เพื่อประเมินผลของสารอินทรีย์ที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำต่อการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษา 5 ขั้นตอนโดยมีกรอบการทำงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1-1

1.3.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI) และตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน (NH₂-MIL-53(AI)) โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง

1.3.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ โดยศึกษาโครงสร้างผลึก พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับ ประจุบนพื้นผิวดูดซับ ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิวดูดซับ และการวิเคราะห์แร่ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

1.3.3 การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยแยกเป็น 2 กลุ่มคือ สารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มชอบน้ำ และกลุ่มไม่ชอบน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล ภายหลังกระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Conventional activated sludge, CAS) ทำการแยกประเภทสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการแยก (Fractionation) ด้วยเรซิน (Resin DAX-8) วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำศึกษาโดยใช้ดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์คือ สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Total organic carbon: TOC) วิเคราะห์ความเข้มข้นโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (Total organic carbon analyzer) และคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำ FEEM โดยฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี (Fluorescence spectroscopy)

1.3.4 การศึกษากระบวนการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนบนตัวกลางดูดซับ

ศึกษาการดูดซับโดยทำการทดลองแบบที่ละเท ที่สภาวะพีเอช 7 ทำการควบคุมความแรงของประจุ โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 โมลาร์ ทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารตกค้างจากยาในการศึกษานี้ประกอบด้วยคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน และตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC) ใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3.4.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

โดยใช้ตัวกลางดูดซับปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสารละลายคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยวเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา ตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง

1.3.4.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์

โดยใช้สารละลายคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษา จลนพลศาสตร์การดูดซับ

1.3.4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำในน้ำเสียสังเคราะห์

โดยใช้สารละลายคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเลือกศึกษาเฉพาะตัวกลางดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี ที่สุดจากการทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

1.3.4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูง

โดยใช้สารละลายที่มีการผสมคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (รวมกันทั้ง 3 ชนิด) โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

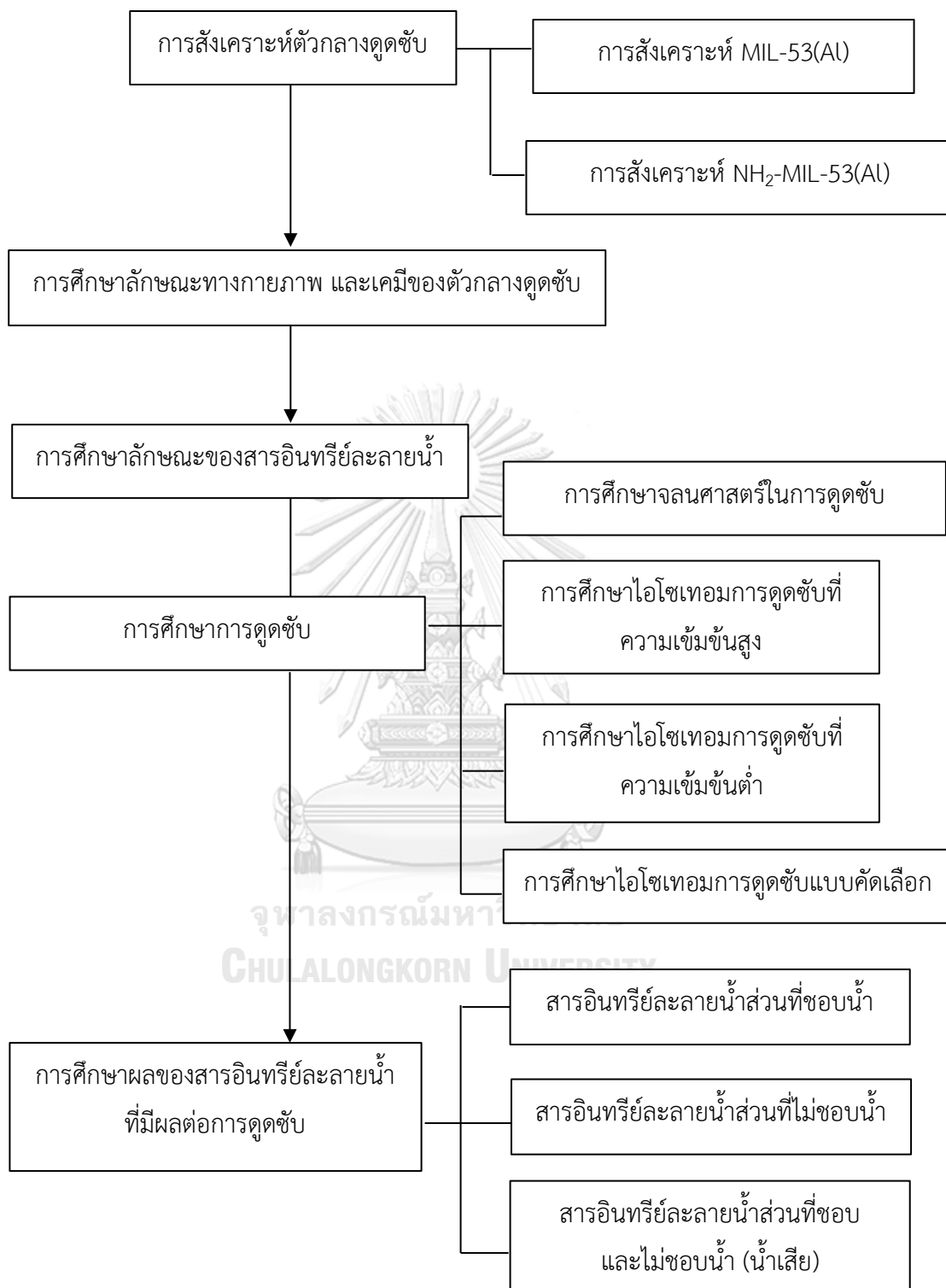
1.3.4.5 การศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM) ที่มีผลต่อการดูดซับ

การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดน้ำเสีย โดยนำสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ ชนิดไม่ชอบน้ำ และทั้งที่ชอบน้ำร่วมกับไม่ชอบน้ำ (น้ำเสีย) ร่วมกับ คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน เช่นเดียวกับการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว และแบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถจำลองกลไกการดูดซับของ MIL-53(AI) ในการดูดซับคีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนร่วมกับการมีอยู่ของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM) และประเมินผลกระทบของ สารอินทรีย์ละลายน้ำต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารตกค้างจากยา





รูปที่ 1- 1 แผนภาพแสดงกรอบการทำงานวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

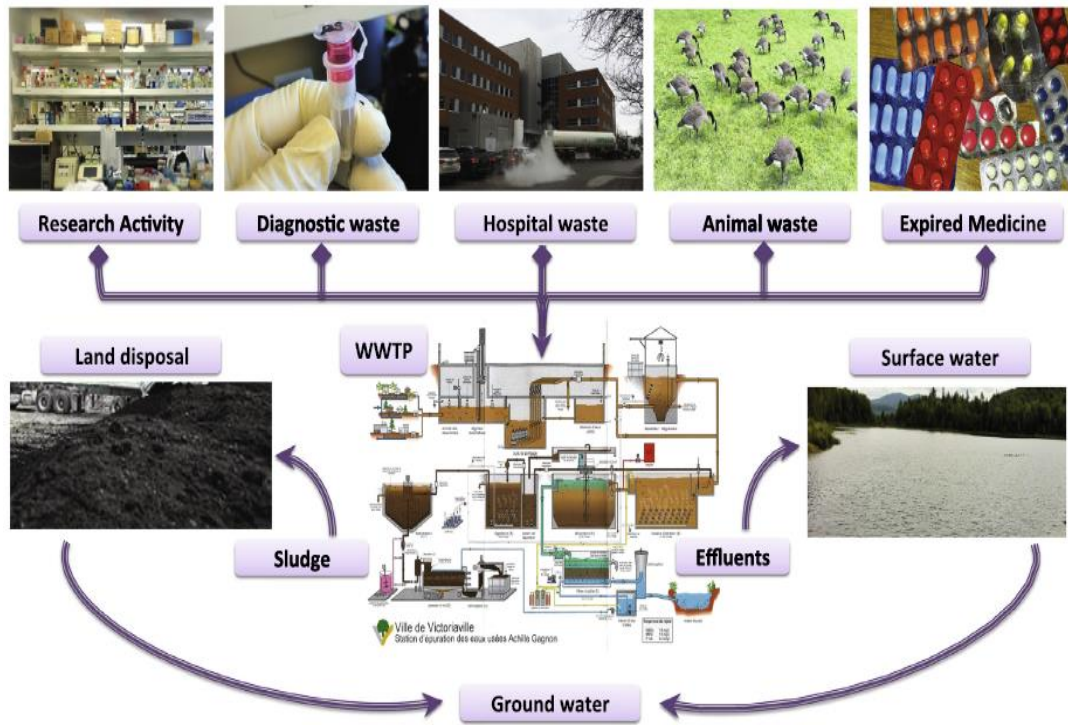
2.1 สารตกค้างจากยาในสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันการเกิดขึ้นของสารตกค้างจากยาในสิ่งแวดล้อมทางน้ำได้กลายเป็นปัญหาระดับโลก และเพิ่มความกังวลทางสิ่งแวดล้อม หากมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต และระบบนิเวศได้ สารตกค้างจากยาจัดว่าเป็นสารมลพิษอุบัติใหม่ จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว และการยกระดับมาตรฐานของการใช้ชีวิต ทำให้มีการใช้ยาเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทั้งในมนุษย์และสัตว์ เมื่อมีการบริโภคยาเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ หรือสัตว์แล้วร่างกายไม่สามารถทำการสลาย (Metabolism) ได้อย่างสมบูรณ์ ร่างกายอาจจะทำการกำจัดออกมาในรูปของตัวยาเดิม หรือมีการเปลี่ยนรูปของตัวยาเดิมซึ่งบางครั้งอาจมีความเป็นพิษมากกว่าเดิม หรือเป็นสารที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมขึ้นได้ (Tiwari และคณะ, 2017)

อีกทั้งองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency: U.S.EPA) ยังมีการระบุแหล่งกำเนิดและการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของยาหลายทาง ดังนี้ 1. จากการใช้ยาของคนและสัตว์ โดยมีการทิ้งยาที่ไม่ได้ใช้หรือหมดอายุในขยะชักโครก หรือวางระบายน้ำ ทำให้เป็นการปล่อยของเสียออกมาในรูปของตัวยาเดิมหรือมีการเปลี่ยนรูปของตัวยาเดิม หรือเป็นสารที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมขึ้นได้ 2. การปล่อยน้ำเสียซึ่งได้รับการบำบัด และไม่ได้บำบัดจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น โรงพยาบาล สถานีอนามัย และโรงงานผลิตยา 3. การปล่อยน้ำทิ้งที่ได้รับการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน 4. การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้เพื่อเป็นปุ๋ย 5. การเลี้ยงสัตว์น้ำเศรษฐกิจในแหล่งน้ำธรรมชาติ 6. การทิ้งขยะชุมชน ขยะโรงพยาบาล และเกิดการรั่วซึมของน้ำชะขยะจากบ่อฝังกลบขยะ โดยมีการตรวจพบสารตกค้างจากยาในสิ่งแวดล้อมทางน้ำไม่ว่าจะเป็น น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินโดยมีความเข้มข้นในปริมาณตั้งแต่ระดับนาโนกรัมต่อลิตร (ng/L) จนถึงระดับไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$)

ซึ่งนอกจากนั้นยังมีการสะสมสารตกค้างจากยาในสิ่งมีชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ U.S.EPA ในปี 2012 มีการรายงานพบการปนเปื้อนสารตกค้างจากยาในเนื้อเยื่อปลาที่อาศัยอยู่ในแม่น้ำ 5 สายของประเทศสหรัฐอเมริกา และมีข้อแนะนำในการศึกษาในอนาคตว่าควรศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อระบบนิเวศ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มี การตรวจพบผลกระทบของสารตกค้างจากยาต่อสุขภาพมนุษย์ ซึ่ง U.S.EPA ได้มีการปรับแผนกลยุทธ์ในการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพมนุษย์ โดยไอบูโพรเฟน และนาพรอกเซน เป็นยาที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อม และเป็นยาที่มีความถี่ในการตรวจพบมากที่สุด และเป็นตัวแทนของสารตกค้างจากยา เนื่องจากมีการปล่อยออกมาสู่แหล่งน้ำปริมาณมาก และมีความถี่ในการพบมากทั้งในน้ำดื่ม และน้ำผิวดิน (Westerhoff และคณะ, 2005; Aksamitowska และคณะ, 2018)

สำหรับในประเทศไทยมีการตรวจพบการปนเปื้อนของสารตกค้างจากยาในแหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ในน้ำเสีย และน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้มีการสำรวจปริมาณสารตกค้างยาในระบบบำบัดน้ำเสียทั้งน้ำเสียขาเข้าระบบ น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัด (วาสิกา เศวตโยธิน และคณะ, 2559) และในแม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีการพบมากกว่า 25 ชนิด รวมถึงน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียของเทศบาล และโรงพยาบาลหลายแห่ง ซึ่งพบว่าประเภทยาที่พบส่วนใหญ่ คือยาในกลุ่มของยาแก้ปวดและยาแก้อักเสบ โดยมีการปล่อยสารตกค้างจากยาสู่สิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง และคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน หรือตกค้างยาวนานในแหล่งน้ำ (Feng และคณะ, 2013)



รูปที่ 2- 1 แหล่งกำเนิดและการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของยา
(ที่มา : Tiwari และคณะ, 2017)

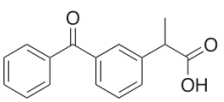
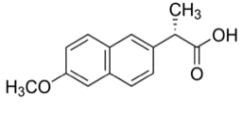
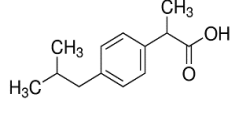
2.2 ยาแก้ปวดและยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ (Non-steroidal anti-inflammatory drugs: NSAIDs)

เป็นกลุ่มยาแก้ปวด (บรรเทาปวด) โดยจัดอยู่ในประเภทยาเอ็นเสด (Non-steroidal anti-inflammatory drugs: NSAIDs) ดังนั้นจึงเป็นทั้งยาแก้ปวด และยาต้านการอักเสบชนิดไม่ใช้สเตียรอยด์ ซึ่งเป็นยาที่มีการนิยมใช้ในประเทศไทย และต่างประเทศ รักษาอาการปวด ลดไข้ และรักษาการอักเสบของเนื้อเยื่อที่ไม่ได้เกิดจากการติดเชื้อ (เช่น ในโรคข้อต่างๆ) แพทย์มีการใช้ยาในกลุ่มนี้เพื่อต้านการแข็งตัวของเลือดในการป้องกันและรักษาโรคหลอดเลือดหัวใจ โรคหลอดเลือดสมอง โดยทั่วไป ยาเอ็นเสด มักใช้รักษา โรคข้ออักเสบต่างๆ โรคข้อรูมาตอยด์ โรคเกาต์ ปวดศีรษะไมเกรน และอาการปวดกระดูกจากโรคมะเร็งแพร่กระจายเข้ากระดูก เป็นต้น

กลไกการออกฤทธิ์ของยา NSAIDs เมื่อการอักเสบของอวัยวะในร่างกายเกิดจากการที่เซลล์หลั่งสารที่เรียกว่า พรอสตาแกลนดิน (Prostaglandin) ซึ่งเป็นสารสื่อกลางในการกระตุ้นทำให้เกิดการอักเสบ ยาในกลุ่ม NSAIDs นี้ออกฤทธิ์โดยการยับยั้งเอนไซม์ (Enzymes) ที่เรียกว่า Cyclooxygenases (COX) ทำให้การหลั่งของสารพรอสตาแกลนดินลดลงทำให้การอักเสบลดลง และลดอาการปวด การยับยั้งเอนไซม์ดังกล่าวทำให้เกิดผลข้างเคียงต่อระบบร่างกายได้หลายประการ เช่น ผลข้างเคียงต่อระบบทางเดินอาหาร ระบบหัวใจและหลอดเลือด ผลข้างเคียงต่อตับและไต (อภิรักษ์ ราชภูริวิจิตร, 2557)

ยาคีโตโพรเฟน (Ketoprofen: KET) นาพรอกเซน (Naproxen: NPX) และไอบูโพรเฟน (Ibuprofen: IBU) เป็นยาที่อยู่ในกลุ่ม NSAIDs มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนๆ (Carboxylic acids) (Monteiro และ Boxall, 2010) มีโครงสร้างทางเคมีอยู่ในกลุ่ม Propionic acids เป็นยาที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย มีการบริโภคปริมาณมาก อีกทั้งยังมีความถี่การตรวจพบสูง และปริมาณมากที่สุด ในน้ำเสียทั้งที่เป็นน้ำเสียทั่วไป และน้ำเสียจากโรงพยาบาล อีกทั้งแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศ (Verlicchi, Aukidy, และ Zambello, 2012; Li และคณะ, 2012; Jiang และคณะ, 2013; Zhao และคณะ, 2017)

ตารางที่ 2- 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

	คีโตโพรเฟน	นาพรอกเซน	ไอบูโพรเฟน
สูตรโครงสร้าง			
สูตรโมเลกุล	$C_{16}H_{14}O_3$	$CH_3OC_{10}H_6CH(CH_3)CO_2$	$C_{13}H_{18}O_2$
มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	254.28	230.26	206.28
ประเภทยา	Non-steroidal inflammatory drugs		
ความสามารถใน การละลายน้ำ (mg/L)	51	16	21
pKa	4.45	4.15	4.91
Log Kow	3.12	3.18	3.97
ใช้สำหรับ	มนุษย์และสัตว์		
CAS Number:	22071-15-4	22204-53-1	15687-27-1

(ที่มา: Monteiro และ Boxall, 2010; Feng และคณะ, 2013; Coimbra และคณะ, 2015; Lonappana และคณะ, 2016)

2.3 คีโตโพรเฟน (Ketoprofen: KET)

คีโตโพรเฟนเป็นยาที่อยู่ในกลุ่มยาเอ็นเสด (NSAIDs) ซึ่งมีฤทธิ์บรรเทาอาการปวดและลดไข้ มีการจัดจำหน่ายมีทั้งยารับประทาน ยาฉีด และเจลทาผิวหน้ง คีโตโพรเฟนจัดเป็นยาที่มีการใช้ในหลายประเทศของแถบทวีปยุโรปเพื่อบรรเทาอาการข้ออักเสบ ปวดจากโรคข้อรูมาตอยด์ ปวดกล้ามเนื้อ ปวดฟัน ปวดประจำเดือน อาการปวดจากการผ่าตัดกระดูก รวมไปถึงอาการปวดฟัน ในผู้ป่วยหลายราย สำหรับประเทศไทย คีโตโพรเฟนจัดเป็นยาอันตราย การใช้ยาจึงควรต้องอยู่ภายใต้คำสั่ง แพทย์ผู้รักษาเท่านั้น คีโตโพรเฟนมีสรรพคุณรักษาอาการปวดจากโรคข้ออักเสบ รูปแบบยาที่มีการใช้ในปัจจุบันยาแคปซูล ขนาดความแรง 100 มิลลิกรัมต่อแคปซูล ยาเจลทาผิวหน้งขนาดความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ยาฉีดขนาดความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อ 2 มิลลิลิตร (อกภัย ราชภฏวชิตร, 2557) ในประเทศไต้หวันมีการบริโภคยาคีโตโพรเฟนปีละประมาณ 7.9 ตันในปี 2549 (Wang และคณะ, 2018) และกว่า 22 ตันในปี 2547 อีกทั้งมีการพบในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียในระดับความเข้มข้นสูงถึง 1.0 ไมโครกรัมต่อลิตร และการศึกษาหลายชิ้นได้รายงานผลพิษต่อปลาที่ความเข้มข้นนี้ (Diniz และคณะ, 2015) จากการสำรวจของปศุสัตว์ในประเทศอินเดียมีพบระดับความเป็นพิษของคีโตโพรเฟนในอาหารของแร้ง (Feng และคณะ, 2013)

ภายหลังการบริโภคยาคีโตโพรเฟนร่างกายจะสามารถทำการกำจัดออกได้กว่าร้อยละ 80 โดยการขับถ่ายในรูปปัสสาวะ และน้ำดีจากตับโดยกระบวนการที่เรียกว่า กลูคูโรนิเดชัน (Glucuronidation) และในรูปที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Wuersch และคณะ, 2005) คีโตโพรเฟนเป็นยาที่จัดอยู่ในกลุ่มบำบัดได้ยากคือมีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 20 ถึง 50 (Patel และคณะ, 2019) มีการพบยาคีโตโพรเฟนในน้ำเสียในต่างประเทศเช่น ฟินแลนด์ 600 ถึง 2,000 ออสเตเรีย 200 และสเปน 300–1,360 นาโนกรัมต่อลิตร (Sui และคณะ, 2010) คีโตโพรเฟนได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเพิ่มความเสี่ยงในการบาดเจ็บของไตของสัตว์ที่มีกิบเท้า และแร้งสีน้ำตาล อีกทั้งมีผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์หรือต่อมไร้ท่อต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นคีโตโพรเฟนได้รับการจัดเป็นสารที่ต้องติดตามความปลอดภัยจากการใช้ยาที่รายงานการวิเคราะห์สารตกค้างคีโตโพรเฟนในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติตั้งแต่ปี 2010 เนื่องจากมักมีการพบในสิ่งแวดล้อมหลายแห่งรวมถึงน้ำเสียและน้ำเสียที่บำบัดแล้ว น้ำ, ของแข็ง (กากตะกอนน้ำเสียและตะกอน), น้ำที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่และน้ำชะขยะที่ฝังกลบทั่วโลก (Wang และคณะ, 2018)

2.4 นาพรอกเซน (Naproxen: NPX)

ในปี 2547 มีปริมาณการบริโภคยานาพรอกเซนของประเทศฝรั่งเศส อังกฤษ และสเปน 37,332, 33,580 และ 42,600 กิโลกรัมต่อปีตามลำดับ (Monteiro และ Boxall, 2010) มีการสั่งจ่ายยาโดยแพทย์ปริมาณ 108,435 กิโลกรัมต่อปี ในประเทศอังกฤษปี 2012 (Petrie, Barden, และ Hordern, 2015) โดยยานาพรอกเซนนำมาใช้ในการรักษาอาการเจ็บปวด บวม และอักเสบที่มาจากสาเหตุต่างๆ เช่น ข้ออักเสบ เอ็นอักเสบ โรครูมาตอยด์ โรคเก๊าท์ ปวดกล้ามเนื้อ หรือปวดประจำเดือน ในผู้ใหญ่รับประทานครั้งละ 500 – 1,000 มิลลิกรัมต่อวัน

นาพรอกเซนสามารถถูกย่อยสลายโดยแสง (Photodegraded) ได้ ซึ่งสารพลอยได้ของนาพรอกเซนที่เกิดขึ้นนั้นมีความเป็นพิษมากกว่ายานาพรอกเซนเดิม (Bosca และคณะ, 1990; Feng และคณะ, 2013; Utrilla และคณะ, 2013; Kalyva, 2017) นาพรอกเซนสามารถละลายได้ดีในไขมัน (Lipophilic) และสามารถละลายในน้ำได้ปานกลาง ซึ่งมีความคงทนในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลามากกว่า 1 ปีทำให้เกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิต (Stancová และคณะ, 2015) เป็นสารในกลุ่มที่สามารถบำบัดได้ปานกลางประมาณร้อยละ 50 (วาสิกา เศวตโยธิน และคณะ, 2559) พบปริมาณสูงสุดในน้ำทิ้งในหลายประเทศ ซึ่งปริมาณพบสูงสุดที่ประเทศอิตาลี 5.22 ไมโครกรัมต่อลิตร ในน้ำผิวดิน 2 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีการพบในน้ำเสียจากโรงพยาบาลปริมาณ 0.5 ถึง 7.84 ไมโครกรัมต่อลิตร (Bagheria และคณะ, 2016) ในประเทศเกาหลีมีการรายงานพบนาพรอกเซนในแม่น้ำสายหลักความเข้มข้น 0.326 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับในประเทศไทยได้มีการตรวจพบนาพรอกเซนเช่นเดียวกัน ปริมาณความเข้มข้นที่พบในน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสีย 5 แห่ง ในกรุงเทพมหานครคือ 39 ถึง 933 นาโนกรัมต่อลิตร และมีการตรวจพบในน้ำผิวดินคือแม่น้ำเจ้าพระยา และคลอง 6 สายในกรุงเทพฯ ที่ความเข้มข้น 41 และ 481 นาโนกรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่ามีค่า Predicted no-effect concentration (PNEC) 0.64 ไมโครกรัมต่อลิตร (Tewari และคณะ, 2013)

นาพรอกเซนมีความเป็นพิษอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Petrie และคณะ, 2015) โดยมีค่า EC50 (*Daphnia magna*) 15 ไมโครกรัมต่อลิตร (Feng และคณะ, 2013) จากการทดสอบความเป็นพิษทางชีวภาพ (Bioassay) ของนาพรอกเซนพบว่ามีความเป็นพิษแบบเรื้อรังมากกว่า

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน โดยมีการรายงานความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของการมีอยู่ร่วมกันของยาในกลุ่ม NSAIDs (ไอบูโพรเฟน และนาพรอกเซน) มีความรุนแรงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นเดียวกันของยาแบบเดี่ยว (Feng และคณะ, 2013)

2.5 ไอบูโพรเฟน (Ibuprofen: IBU)

ในปี 2547 มีปริมาณการบริโภคยาไอบูโพรเฟนของประเทศฝรั่งเศส อังกฤษ และสเปน 240,024, 330,292 และ 276,100 กิโลกรัมต่อปีตามลำดับ (Monteiro และ Boxall, 2010) โดยมีการสั่งจ่ายยาโดยแพทย์ปริมาณกว่า 108,435 กิโลกรัมต่อปี ในประเทศอังกฤษปี 2012 (Petrie และคณะ, 2015) มีสรรพคุณเป็นยาแก้ปวดระดับน้อยถึงปานกลาง สามารถใช้บรรเทาอาการปวดจากข้ออักเสบ ปวดประจำเดือน และใช้เป็นยาลดไข้ได้ นอกจากนี้ทางการแพทย์ยังนำไปใช้รักษาอาการปวดจากโรคข้อบางชนิดและบรรเทาอาการปวดศีรษะไมเกรน การรับประทานยาชนิดเม็ด ขนาด 200 และ 400 มิลลิกรัม และชนิดน้ำขนาด 100 มิลลิกรัมในน้ำ 1 ซ้อนชา สำหรับผู้ใหญ่ขนาดสูงสุดที่รับประทานไม่ควรเกิน 2.4 กรัมต่อวัน

ร้อยละ 15 ของไอบูโพรเฟนถูกขับออกมาจากร่างกายหลังการรับยาเข้าไป และร้อยละ 26 จะถูกเมทาบอลิซึม ไอบูโพรเฟนที่ผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของร่างกายแล้วจะทำให้มีความเป็นพิษมากกว่าไอบูโพรเฟนเดิมซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ มีการพบว่าไอบูโพรเฟนที่ความเข้มข้นต่ำส่งผลทำให้ลดปริมาณไข่ของปลาหมากลาย (*Danio rerio*) และมีส่วนทำให้เกิดลักษณะเพศหญิง (Estrogenic effects) ของปลาหมากลายโตเต็มวัยเมื่อได้รับสัมผัสเป็นเวลา 21 วันมีการส่งผลกระทบต่อการสืบพันธุ์และการพัฒนาของรุ่นลูกหลาน (Ji และคณะ, 2013) ในการศึกษาเมื่อได้รับสัมผัสแบบรุนแรงส่งผลทำให้เกิดการตาย และการศึกษาในการได้รับสัมผัสในระยะยาวได้ศึกษาเฉพาะสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังเช่นไฮดรา (Quinn และคณะ, 2011) และหอย (Pounds และคณะ, 2008) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไอบูโพรเฟนทำให้เกิดความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์เปลี่ยนแปลงฮอร์โมนเพศในระดับพลาสมา รวมทั้งระดับฮิปโปทาลามิก-พิทูอิทารี-โกนาด (Hypothalamic-pituitary-gonad: HPG) ในปลาหมากลาย (Ji และคณะ, 2013) และเป็นสารอยู่ในกลุ่มที่สามารถบำบัดปานกลางประมาณร้อยละ 50 (วาติกา เศวตโยธิน และคณะ, 2559)

ความเข้มข้นที่พบในน้ำเสียในหลากหลายประเทศ 0.004 ถึง 603 ไมโครกรัมต่อลิตร (Luo และคณะ, 2014) ในประเทศอังกฤษ 1,681 ถึง 33,764 นาโนกรัมต่อลิตร ในน้ำผิวดิน 5,044 นาโนกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียโรงพยาบาล 0.49 ถึง 990 ไมโครกรัมต่อลิตร (Bagheria และคณะ, 2016) ในประเทศไทยมีการพบปริมาณไอบูโพรเฟนในน้ำเสีย 385 ถึง 1,260 นาโนกรัมต่อลิตร และในคลอง 6 สายและแม่น้ำเจ้าพระยาในกรุงเทพฯ 49 ถึง 103 นาโนกรัมต่อลิตร มีการพบปริมาณไอบูโพรเฟนในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ และน้ำเสียแม้มีความเข้มข้นต่ำแต่เป็นภัยคุกคามต่อความยั่งยืนของระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ (Heberer, 2002; Brozinski และคณะ, 2012; Luo และคณะ, 2014) เนื่องจากความเป็นไปได้ของความเป็นพิษเรื้อรังและเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตในเนื้อเยื่อของแพลงก์ตอนพืชแพลงก์ตอนสัตว์และปลา (Cleuvers, 2004; Kim และคณะ, 2007; Heckmann และคณะ, 2007; Han และคณะ, 2010; Quinn และคณะ, 2011)

ตารางที่ 2- 2 ข้อมูลความเป็นพิษของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

ความเป็นพิษ		Non-steroidal anti-inflammatory drugs		
		คีโตโพรเฟน	นาพรอกเซน	ไอบูโพรเฟน
Acute toxicity (EC50 mg/L)	Daphnia	248	15	38
	Algae	164	22	26
	Fish	32	35	5
Acute toxicity (LC50 mg/L)	Daphnia	64	43.5	9.1
	Algae	-	320	7.1
	Fish	-	560	173

(ที่มา: Luo และคณะ 2014)

ตารางที่ 2- 3 ปริมาณคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่ตรวจพบในประเทศไทย

แหล่งที่มา	ไม่โครกรัมต่อลิตร (สูงสุด)			อ้างอิง
	คีโตโพรเฟน	นาพรอกเซน	ไอบูโพรเฟน	
น้ำเสียโรงพยาบาลขนาดใหญ่ *	-	0.81	0.82	
น้ำเสียของเทศบาลเมืองฉะเชิงเทรา	-	0.22	0.45	วารลิกา เสวตโยธิน, 2559
น้ำทิ้งของเทศบาลเมืองฉะเชิงเทรา	-	0.27	0.81	
น้ำที่ผ่านการบำบัด (แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง)	-	0.015	6.7	
น้ำผิวดิน (แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง)	0.02	1.9	5.4	
น้ำเสียเข้าโรงบำบัดน้ำเสีย (กรุงเทพฯ)	-	0.933	1.26	
น้ำทิ้งโรงบำบัดน้ำเสีย (กรุงเทพฯ) **	-	0.159	0.149	Tewari และคณะ, 2013
น้ำผิวดิน (คลองกรุงเทพฯ)	-	0.481	1.03	
น้ำผิวดิน (แม่น้ำเจ้าพระยากรุงเทพฯ)	-	0.041	0.049	

* โรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร

** โรงบำบัดน้ำเสีย (กรุงเทพฯ : สีพระยา, รัตนโกสินทร์, ช่างนนทรี, ดินแดง และทุ่งครุ)

ตารางที่ 2- 4 ปริมาณสารตกค้างจากยาที่พบในน้ำผิวดินแต่ละประเทศของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

ประเทศ	ปริมาณสูงสุด (นาโนกรัมต่อลิตร)			อ้างอิง
	คีโตโพรเฟน	นาพรอกเซน	ไอบูโพรเฟน	
แคนาดา	-	87	79	Kleywegt และคณะ, 2011
จีน	54.5	328	1,417	Peng และคณะ, 2008
คอ스타ริกา	9,808	-	36,788	Spongberg และคณะ, 2011
ฝรั่งเศส	22	6.4	8	Vullie, Olivé, และ Loustalot, 2011
กรีซ	39.5	322	67	Stasinakis และคณะ, 2012
เกาหลี	226	12	414	Kim และคณะ, 2009; Wang และคณะ, 2018; Won, Ji, และ Jeong, 2010
ไต้หวัน	190	-	280	Lin และคณะ, 2011
อังกฤษ	14	149	100	Kasprzyk-Hordern, Dinsdale, และ Guwy, 2009
อเมริกา	9,808	135.2	77	Pal และคณะ 2010; Wang และคณะ, 2011; Wang และคณะ, 2018
แอฟริกาใต้	9,220	59,300	17,600	Patel และคณะ, 2019
เวียดนาม	120	146	100	Tran, Urase, และ Ta, 2014
เซอเบีย	45	74.2	346	Patel และคณะ, 2019
สวีเดน	1.3	0.22	2.2	Patel และคณะ, 2019
ออสเตรเลีย	79.6	360	181	Pal และคณะ, 2010
สวิตเซอร์แลนด์	180	2,600	1,300	Tixier และคณะ, 2003

ตารางที่ 2- 5 ปริมาณสารตกค้างจากยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่พบในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล

ประเทศ	ปริมาณสูงสุด (นาโนกรัมต่อลิตร)			อ้างอิง
	คีโตโพรเฟน	นาพรอกเซน	ไอบูโพรเฟน	
ไต้หวัน	231	1,010	300	Lin และ Tsai, 2009
โปรตุเกส	3,250	6,042	38,148	Patel และคณะ, 2019
เวียดนาม	1.62	0.55	1.85	Patel และคณะ, 2019
อิตาลี	110	830	1,000	Verlicchi และคณะ, 2012
อเมริกา	5,250	11,210	20,480	Oliveira และคณะ, 2015

2.6 การกำจัดสารตกค้างจากยา

2.6.1 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมีจุดมุ่งหมายเพื่อกำจัดมลสารที่อยู่ในน้ำเสียเช่น สารอินทรีย์ละลายน้ำ สารแขวนลอย (Coimbra และคณะ, 2015) ให้มีคุณภาพดีขึ้นและไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายต่อแม่น้ำ ลำคลอง แหล่งน้ำธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปใช้กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Treatment) หรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยใช้ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์แบบดั้งเดิม (Conventional activated sludge, CAS) ระบบนี้เป็นเทคนิคแบบดั้งเดิมและนิยมใช้ทั่วโลกเพื่อบำบัดน้ำเสียเนื่องจากเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ สารแขวนลอยและตะกอนสูงระบบหนึ่ง ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 85 ถึง 95 จึงเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน อาคาร และโรงงานอุตสาหกรรม แต่ระบบบำบัดนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ หรือมีประสิทธิผลต่ำในการกำจัดมลสารที่มีความคงทนขนาดเล็กละเอียดอย่างสารตกค้างจากยาได้ (Tiwari และคณะ, 2017)

การกำจัดคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนโดยระบบ CAS ของโรงบำบัดน้ำเสียทั่วไปมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำถึงปานกลางคือ ร้อยละ 0 ถึง 50 (Gagnon และ Lajeunesse,

2008; Utrilla และคณะ, 2013; Luo และคณะ, 2014; Petrie และคณะ, 2015) สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียของไทยมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างต่ำเช่นกัน คือร้อยละ 31 (Tewari และคณะ, 2013) นาพรอกเซนร้อยละ 35 ไอบูโพรเฟนต่ำกว่าร้อยละ 10 (Verlicchi และคณะ, 2012) และมีการพบสารตกค้างจากยาซีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Shon, Vigneswaran, และ Snyder, 2007) แสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2- 6 แสดงปริมาณซีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่มีการตรวจพบในน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย CAS

ประเทศที่พบ	ปริมาณสูงสุด (นาโนกรัมต่อลิตร)			อ้างอิง
	ซีโตโพรเฟน	นาพรอกเซน	ไอบูโพรเฟน	
ไทย	-	159	149	Tewari และคณะ, 2013
ญี่ปุ่น	-	139	100	วาเลีย เศวตโยธิน, 2559
เกาหลี	300	128	238	Won และคณะ, 2011
จีน	134			Wang และคณะ, 2018
อเมริกาใต้	-	5,100	3,600	Pal และคณะ, 2010
แคนาดา	-	860	24,600	วาเลีย เศวตโยธิน, 2559; Mompelat, Bot และ Thomas, 2008
อังกฤษ	-	703	27,256	
เยอรมัน	-	940	3,700	
สวีเดน	-	2,150	7,110	Evgenidou, Konstantinou, และ Lambropoulou, 2015
ไซปรัส	120	10	82	Patel และคณะ, 2019
ฝรั่งเศส	107.2	355.3	526.7	Patel และคณะ, 2019
กรีซ	220	-	-	Papageorgiou, Kosma, และ Lambropoulou, 2016
อินเดีย	23.4	-	1,940	Patel และคณะ, 2019
จอร์แดน	-	1.3	2.2	Patel และคณะ, 2019
โปรตุเกส	320	774	1097	Santos และคณะ, 2013
เวียดนาม	380	520	7,900	Tran และคณะ, 2014
อิตาลี	85	18	81	Verlicchi และคณะ, 2012
สเปน	539	2,208	653	Rosal และคณะ, 2010
ออสเตรเลีย	-	548	1,758	Pal และคณะ, 2010

2.6.2 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation–Flocculation)

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันเป็นกระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยคอลลอยด์ และสารอินทรีย์ละลายน้ำบางชนิดในน้ำที่มีขนาดเล็กรวมตัวกันจนเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนได้ง่าย สำหรับขั้นตอนการสร้างตะกอนให้มีขนาดใหญ่โดยการเติมสารเคมีมี 2 ขั้น คือขั้นตอนการเกิดตะกอน (Coagulation) และขั้นตอนการรวมตัวของตะกอน (Flocculation) (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2538) ซึ่งกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันนั้นไม่มีประสิทธิภาพหรือมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดมลสารขนาดเล็กส่วนใหญ่ในน้ำเสีย (Matamoros และ Salvadó, 2013; Ensano, 2017) โดยโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มหรือเฟอร์ริกซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตกค้างจากยาได้น้อยกว่าร้อยละ 20 (Bolong และคณะ, 2009) การบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันในการกำจัด คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนมีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 4, 42, และ 23 ตามลำดับ (Suárez, Lema, และ Omil, 2009; Luo และคณะ, 2014)

2.6.3 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOP)

วิธีการบำบัดน้ำที่อาศัยกระบวนการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีเรียกว่า วิธีออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOPs) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำวิธีนี้อาศัยองค์ประกอบที่มีความไวต่อการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\bullet\text{OH}$) ซูเปอร์ออกไซด์ (O_2) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในการย่อยสารอินทรีย์ (Chong และคณะ, 2010) โดยกระบวนการบำบัดออกซิเดชันขั้นสูงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตกค้างจากยาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการในการกำจัดอื่นๆ ซึ่งมีร้อยละในการกำจัดสารตกค้างจากยามากกว่าร้อยละ 99 แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ใช้พลังงานในการดำเนินการมาก และมีค่าใช้จ่ายสูง และก่อให้เกิดสารพลอยได้ที่มีความเป็นพิษ ซึ่งอาจจะมีความเป็นพิษมากกว่าสารตั้งต้น (Luo และคณะ, 2014; Hasan และคณะ, 2016)

2.6.4 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการเมมเบรน (Membrane)

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสาร หรือทำให้สารบริสุทธิ์ โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนทำให้สารละลายไหลผ่านเมมเบรนแล้วเกิดการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว กระบวนการเมมเบรนที่มีใช้กันได้แก่ 1) ออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis , RO) 2) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) 3) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) 4) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) (อชิป เหลืองโพธิ์, 2551) การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยใช้เมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดตัวการกำจัดคีโตโปรเฟนโดยออสโมซิสแบบผันกลับมีประสิทธิภาพค่อนข้างน้อยคือร้อยละ 64.3 (Patel และคณะ, 2019) ในการศึกษาการกำจัดสารตกค้างจากยาโดยเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดนาพรอกเซนร้อยละ 60 และการกำจัดไอบูโพรเฟนโดยการออสโมซิสแบบผันกลับมีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99 แต่เป็นวิธีที่ใช้พลังงานสูง อีกทั้งยังเกิดการอุดตันได้ง่าย (Luo และคณะ, 2014)

2.6.5 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการย่อยสลายโดยใช้แสง (Photo-degradation)

เป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดยาที่มีประสิทธิภาพ (Busar, Poiger, และMüller, 1998) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับยาที่มีความไวต่อแสง หรือมีการสลายตัวเมื่อถูกแสง ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับความเข้ม และความถี่ของแสงที่ใช้ในธรรมชาติสามารถเกิดการย่อยสลายด้วยแสงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำที่มีความใส เพราะแสงสามารถส่องผ่านผิวน้ำลงไปได้อย่างทั่วถึง วิธีนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เมื่อยาปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่มีความขุ่น หรือถูกบดบังด้วยต้นไม้ เช่น คลอง แม่น้ำ และทะเลสาบ การบำบัดด้วยวิธีนี้ความถี่ของแสงมีความสำคัญ โดยจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดกลืนสเปกตรัมของยา ซึ่งส่งผลต่อการดูดซับ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ (Monteiro และBoxall, 2010) การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยการย่อยสลายโดยใช้แสงยูวี พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างต่ำคือ ต่ำกว่าร้อยละ 30 (Utrilla และคณะ, 2013) อีกทั้งยังทำให้เกิดสารพลอยได้จากกร่อยสลายโดยใช้แล้วซึ่งมีพิษมากกว่าตัวไอบูโพรเฟนและนาพรอกเซนเดิม (Han และคณะ, 2010; Feng และคณะ, 2013)

2.6.6 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นระบบพื้นฐาน ง่ายต่อการควบคุมระบบ ออกแบบระบบ และบำรุงรักษาระบบ อีกทั้งมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ วัสดุดูดซับที่มีพื้นฐานคาร์บอนมีหลากหลายชนิด ประกอบด้วย กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิตไฟเบอร์ (Composite fibers) กราฟีนไฮโดรเจล และวัสดุดูดซับพื้นฐานคาร์บอนต่างๆ เช่น แม่เหล็กคาร์บอน (Magnetic carbon) คาร์บอนที่มีการปรับแต่งพื้นที่ผิว คาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยเคมี ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ท่อนาโนคาร์บอน คาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดกลาง ถ่านจากไม้ไผ่ และอื่นๆ (Tiwari, Lalhriatpuia, และ Lee, 2015) วัสดุดูดซับเหล่านี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติของพื้นที่ผิวที่เป็นลักษณะเฉพาะ เช่น มีพื้นที่ผิวสูง และมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก หรือขนาดกลาง สมบัติเหล่านี้ทำให้มีความน่าสนใจมากในการทำให้ น้ำบริสุทธิ์ ตัวอย่างการกำจัดสารตกค้างจากยาโดยใช้กราฟีนออกไซด์ และคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดกลางถูกรายงานว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารตกค้างจากยา อย่างไรก็ตามวัสดุดูดซับพื้นฐานคาร์บอนอื่นๆส่วนใหญ่มักมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตกค้างจากยาก่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน อีกทั้งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับยังมีบทบาทสำคัญในการดูดซับ (Li, Zhang, และHuang, 2017) การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในการกำจัดสารตกค้างจากยา พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไอบูโพรเฟนร้อยละ 40 ถึง 60 และสารตกค้างจากยาอื่นๆร้อยละ 90 (Bolong และคณะ, 2009; Grassi และคณะ, 2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter: DOM)

สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM) สามารถพบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป เป็นส่วนประกอบสำคัญในสภาพแวดล้อมทางน้ำและมีอยู่ในทุกส่วนของน้ำโดยเฉพาะน้ำผิวดิน สารอินทรีย์ละลายน้ำในสิ่งแวดล้อมสามารถเกิดได้จาก 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ 1) ผลผลิตในกระบวนการทางชีววิทยาและปฏิกิริยาเคมีของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายซากพืช ซากสัตว์ลงสู่ดิน 2) กระบวนการที่เกิดจากมนุษย์ (Anthropogenic sources) เป็นกระบวนการที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ลงสู่แหล่งน้ำโดยส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น แหล่งชุมชน เกษตรกรรม

โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น และ 3) ผลผลิตจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำ (Autochthonous production) เกิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจนสามารถละลายน้ำได้

โดยทั่วไปสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งน้ำประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นฮิวมิก (Humic substance) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักและส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก (Non-humic substance) โดยมีฮิวมิกเป็นส่วนประกอบหลักประมาณร้อยละ 45 ถึง 65 ซึ่งมีลักษณะเป็นสารที่มีขี้ มีสีฟางข้าว และเป็นกรดอินทรีย์ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายของดิน และพีชีน้ำ มีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic organic fraction, HPO) ประกอบด้วย กรดฮิวมิก (Humic acid) และกรดฟัลวิก (Fulvic acid) โดยส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิกมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (Hydrophilic organic fraction, HPI) ประกอบด้วย Hydrophilic acids โปรตีน (Proteins) กรดอะมิโน (Amino acid) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ในแหล่งน้ำผิวดินโดยทั่วไปมีสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิกประมาณร้อยละ 35 ถึง 55 (Ruiz และคณะ, 2013)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางเคมีของ ส่วนที่เป็นฮิวมิก และส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก ที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำ พบว่าในส่วนของฮิวมิกมีความสำคัญ และส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมากกว่าส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก (จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์, 2555)

2.7.1 สารฮิวมิก

สารฮิวมิกเป็นสารที่เกิดจากการสลายตัวของซากพืช มีส่วนประกอบที่ซับซ้อน และมีรูปร่างไม่แน่นอน มีลักษณะเป็นสารประกอบสีน้ำตาลหรือดำ มีสภาพเป็นกรด และมีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วงร้อยละหลายล้าน มีโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน และมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆหลายกลุ่ม เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 60 ถึง 90 ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และ คีโตน (Ketone) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีผลต่อการละลายน้ำของสารประกอบฮิวมิก สารฮิวมิกสามารถจำแนกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ และมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2-7

1. กรดฮิวมิก (Humic acid) เป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่พบมากในดิน ซึ่งมีความสามารถละลายในด่าง (Alkaline solution) แต่ไม่ละลายในสารละลายกรดที่มีพีเอชต่ำกว่า 2
2. กรดฟัลวิก (Fulvic acid) เป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน ซึ่งมีความสามารถละลายได้ทั้งในกรด และด่าง

ตารางที่ 2- 7 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก

คุณสมบัติ	กรดฮิวมิก	กรดฟัลวิก
องค์ประกอบธาตุ (%โดยน้ำหนัก)		
C	50-60	40-50
H	4-6	4-6
O	30-35	44-45
N	2-4	<1-3
S	1-2	0-2
ละลายในกรดแก่ (pH<1)	ไม่ละลาย	ละลาย
ช่วงน้ำหนักโมเลกุล	100-หลายล้าน	180-10,000
คาร์บอกซิล (Carboxyl)	14-45	58-65
ฟีนอล (Phenol)	10-38	9-19
แอลกอฮอล์ (Alcohol)	13-15	11-16
คาร์บอนิล (Carbonyl)	4-23	4-11
เมทอกซิล (Methoxyl)	1-5	1-2

(ที่มา : จรงค์พันธ์ มุสิกวงษ์, 2555)

2.7.2 ดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การใช้ดัชนีตัวแทนในการอธิบายคุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วไม่สามารถใช้ดัชนีที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์เพียงชนิดเดียวเพื่อเป็นตัวแทนอธิบายคุณลักษณะโดยรวมที่หลากหลายได้ ซึ่งดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่นำมาใช้แทนการพิจารณาประกอบด้วย ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC), ปริมาณคาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon: DOC), Ultraviolet absorbance ที่ความยาวคลื่น 254 nm (UV-254), Specific Ultraviolet Absorption (SUVA), และ Fluorescence Excitation - Emission fluorescence (FEEM) (มารุต สุขสมจิตร และไตรเทพ วิชัยโกวิทเทน, 2559) โดยในการศึกษานี้ใช้ดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ละลายน้ำคือ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด และ Fluorescence Excitation - Emission fluorescence

2.7.2.1 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC)

TOC โดยทั่วไปใช้เป็นตัวชี้วัดแทนเพื่อใช้วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เป็นส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด DOC สามารถแยกได้โดยการกรองผ่านแผ่นกรองขนาดรูเปิด $0.45 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตาม กระดาษกรองดังกล่าว โดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และไม่สามารถบ่งชี้ที่อุณหภูมิสูงได้ จากข้างต้นจึงมีการใช้ การกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด $0.7 \mu\text{m}$ ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ในการวิเคราะห์ค่า DOC ดังนั้น DOC จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ทั้งหมดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์, 2555)

2.7.2.2 Fluorescence Excitation - Emission fluorescence (FEEM)

FEEM เป็นเทคนิค Fluorescence spectroscopy ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่าง กว้างขวางทั้งในการศึกษาองค์ประกอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแหล่งน้ำ โดยศึกษาจากสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคุณลักษณะ ของสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งในน้ำที่ระบายจากแหล่งกำเนิดมลพิษและในแหล่งน้ำธรรมชาติ การตรวจวัดด้วยเทคนิค Fluorescence spectroscopy สามารถทำได้ง่าย ไม่ต้องมีการเตรียม ตัวอย่างและใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นานนัก นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสามารถแสดงให้เห็น ถึงองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (มารุต สุขสมจิตร และ ไตรเทพ วิชโยโกวิทเทน, 2559)

2.8 กระบวนการแยก (Fractionation) ชนิดของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยเรซิน

กระบวนการ Fractionation สารอินทรีย์ละลายน้ำมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากสามารถ บอกลถึงการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำกับมลสารในกระบวนการดูดซับและ ทำให้เข้าใจลักษณะทางเคมีของสารอินทรีย์ละลายน้ำเพื่อใช้ออกแบบระบบบำบัดที่เหมาะสม ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ กระบวนการแยกสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำโดยเรซินเป็นเทคนิค ที่ใช้เพื่อแยกชนิดของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำธรรมชาติ สามารถจำแนกออกได้เป็นแบบ Hydrophobic fraction (HPO) ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ Fulvic และ Humic acid จัดเป็น ส่วนของ Humic fraction อีกส่วนหนึ่งเป็นแบบ Hydrophilic fraction (HPI) หรือ Non-humic

fraction ซึ่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ และกรดอะมิโนโดยส่วน Hydrophobic fraction ส่วนมากมีโครงสร้างเป็นแบบ Aromatic มากกว่า Hydrophilics สำหรับการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผู้วิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้เรซิน XAD (XAD-2 XAD-4 และ XAD-8) และ DAX (DAX-2 DAX-4 และ DAX-8) สำหรับแยกสาร อินทรีย์กลุ่ม HPI และ HPO สำหรับงานวิจัยในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมใช้เรซินชนิด DAX-8 เนื่องจาก DAX-8 เป็นเรซินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (w/w) ทำให้สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย และสามารถแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำได้ดี (Peuravuori, Lehtonen, และ Pihlaja, 2002)

2.9 โครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่มีรูพรุน

โครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks: MOFs) เป็นวัสดุที่มีความพรุนชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากมีคุณลักษณะการดูดซับและการคายซับที่โดดเด่น หลายชนิดมีหมู่ฟังก์ชันทำให้เกิดการดูดซับที่จำเพาะและเกิดแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้บางชนิดยังมีพื้นที่ผิว และความพรุนที่สูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนประเภทอื่น (อภิพงษ์ พุฒคำ, 2556) โครงข่ายโลหะอินทรีย์เป็นวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูง มีหน่วยย่อยประกอบด้วยไอออนโลหะ (Cluster) ต่อเชื่อมกับลิแกนด์สารอินทรีย์ (Organic ligand) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ผ่านอะตอมออกซิเจนหรือไนโตรเจนหรือซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์โดยในปี 1997 มีรายงานเกี่ยวกับการนำวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์มาใช้ในการศึกษาการดูดซับแก๊ส วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์หลายชนิดจัดเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงและมีสมบัติเฉพาะทาง นอกจากนี้บางชนิดยังสามารถปรับแต่งโครงสร้างของโครงข่ายภายหลังจากการสังเคราะห์ (Post-synthesis modification) ให้มีความจำเพาะทางเคมีมากขึ้น ขณะที่ขนาดของรูพรุนของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์สามารถออกแบบตั้งแต่ก่อนการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ขนาดรูพรุนในระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งขนาดรูพรุนระดับนาโนเมตรนี้จะช่วยทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นจากคุณสมบัติที่กล่าวมานี้จึงทำให้ MOFs ได้รับความสนใจอย่างยิ่งสำหรับการวิจัยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม (Hasan และ Jhung, 2015; Seo และคณะ, 2016; Zhuo และคณะ, 2017)

นอกจากนี้ MOFs จัดว่าเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดในกลุ่มวัสดุที่มีความพรุนและเป็นวัสดุที่มีความพรุนชนิดเดียวที่โครงสร้างของรูพรุนหรือโพรงมีความยืดหยุ่น (Flexible structure) สามารถหดหรือขยายตัวตามสภาวะแวดล้อมที่มากกระตุ้นได้ จากคุณสมบัติเฉพาะตัวของ MOFs ดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้นักวิจัยให้ความสนใจในการสังเคราะห์และพัฒนา MOFs เพื่อเพิ่มศักยภาพในการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมรวมถึงการดักและกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติโดดเด่นหลายอย่างเช่น พื้นที่ผิวและความพรุนที่สูง นอกจากนี้แล้วยังอาจทำการสังเคราะห์ให้มีรูพรุนขนาดเล็ก และทำการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันหลังการสังเคราะห์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับจึงทำให้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์มีความเป็นไปได้สูงในการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับ (Hasan, Choi, และ Jhung, 2013; Bhadra และคณะ, 2017)

2.9.1 MIL-53(AI)

MIL เป็นหนึ่งในชนิดของโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่มีรูพรุนโดยย่อมาจาก Materials Institute of Lavoisier โดย MIL-53(AI) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง มีการนำมาเป็นวัสดุที่ใช้ในการดูดซับแก๊สเช่น ไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง MIL-53(AI) มีคุณสมบัติโดดเด่นคือมีความเสถียรทางอุณหภูมิจนถึง 500 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดอื่นมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวเชื่อมคาร์บอกซิเลต ทำให้พันธะที่เชื่อมกับโลหะมีความแข็งแรงขึ้นและทนต่อการเกิดไฮโดรไลซิส อีกทั้งยังมีความเสถียรทางเคมี มีความเสถียรสูงเมื่อเทียบกับตัวกลางดูดซับแบบทั่วไปตัวอื่นๆ ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเลือกโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดนี้ในการนำมาศึกษา MIL-53(AI) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโลหะคือ อลูมิเนียมไนเตรต ($Al(NO_3)_3$) และตัวเชื่อมอินทรีย์คือ กรดเทเรพทาสิก (Terephthalic acid หรือ 1,4-benzenedicarboxylate, H_2BDC) และลักษณะสำคัญของ MIL-53(AI) นี้คือโครงสร้างสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากรูพรุนขนาดใหญ่ให้เป็นรูพรุนขนาดเล็กและในทางกลับกันได้ เมื่อสัมผัสกับโมเลกุลของแกสต์โมเลกุล (Guest molecules) เช่น CO_2 , H_2O ฯลฯ โดยการใช้ความดันหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ MIL-53 (AI) ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การหายใจ (Breathing effect) เมื่อมีการดูดซับ ซึ่งทำให้มีการปรับปริมาตรของรูพรุนให้เหมาะสมกับโมเลกุลที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ จึงทำให้ MIL-53(AI) ได้รับความศึกษาในการกักเก็บแก๊สไฮโดรเจน และบำบัดน้ำเสีย แม้ MIL-53(AI)

จะมีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพในสารละลายที่เป็นของเหลว แต่มีการศึกษาเกี่ยวกับ MIL-53(Al) จำนวนไม่มากจนถึงขณะนี้ (Patil และคณะ, 2011; Mounfield และ Walton, 2012; Chen และคณะ, 2012; Qian และคณะ, 2013; Mishra และคณะ, 2014; Cheng และคณะ, 2015; Li และคณะ, 2015)

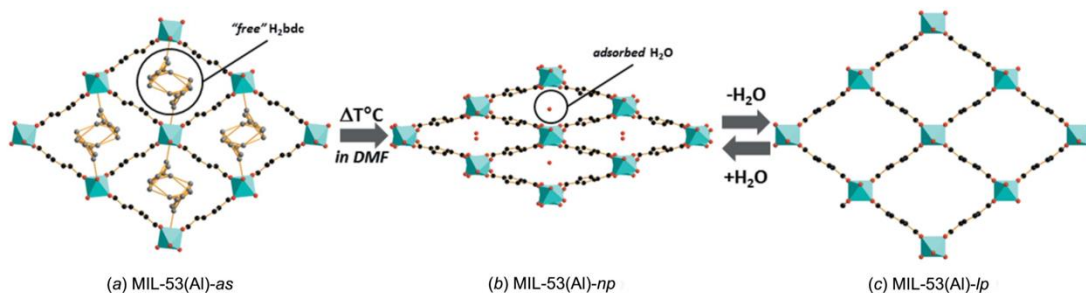


รูปที่ 2- 2 การสังเคราะห์ MIL-53 (Al) ที่อุณหภูมิห้อง
(ที่มา: Sánchez และคณะ, 2015)

2.9.2 ปรากฏการณ์การหายใจ (Breathing effect)

โครงข่ายโลหะอินทรีย์ (MOFs) ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติของ Host-guest ซึ่งทำให้วัสดุเหล่านี้มีแนวโน้มที่ดีสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) และการส่งยา (Drug delivery) (Zhou, Long และ Yaghi, 2012) โครงสร้าง MOF สร้างขึ้นจากคลัสเตอร์ของโลหะออกไซด์และลิแกนด์อินทรีย์ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันและเกิดโครงข่ายผลึกอย่างไม่จำกัด โครงสร้างของ MOF ชนิด MIL-53 (M^{III} – benzene-1,4-dicarboxylate) ที่เกิดขึ้นระหว่างเทรฟทาเลท และ $M = \text{Al}, \text{Fe}, \text{Ga}, \text{Cr}, \text{Sc}$, หรือ In (Loiseau และคณะ, 2015) ทำให้เกิดเป็นเปิดรูพรุนขึ้นซึ่งเรียกว่าผลการหายใจ การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือความดันภายนอก (Beurroies และคณะ, 2010; Yot และคณะ, 2016) รวมถึงการดูดซับอะตอมของ Guest หรือโมเลกุลเช่น ซีนอน, คาร์บอนไดร็อกไซด์, น้ำ, หรือไฮโดรคาร์บอน (Lewellyn และคณะ, 2008) เป็นที่ยอมรับกันดีว่า Breathing effect ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในมิติของช่องรูพรุน เรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit-cell) สามารถเปลี่ยนแปลงย้อนกลับได้ MIL-53 สามารถตกผลึกในโครงข่ายผลึกสามแบบโดยมีลักษณะ

สัณฐานคงเดิม: (1) โครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ (Large-pore structure : lp) เป็นสถานะที่ปราศจากน้ำ; (2) โครงสร้างรูพรุนแคบ (Narrow-pore structure : np) เป็นสถานะที่อยู่ในรูปไฮเดรต (Hydrated form) และ (3) รูปแบบที่ถูกล้างเคราะห์ (As-synthesized form : as) ซึ่งลิแกนด์



เทรฟทาเลทอิสระบางตัวยังคงค้างอยู่ในช่องว่างของรูพรุน (Giovine และคณะ, 2016)

รูปที่ 2- 3 ปรากฏการณ์การหายใจ (Breathing effect) ของ MIL-53(Al)
(ที่มา: Giovine และคณะ, 2016)

2.10 หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups)

หมู่ฟังก์ชัน คือ กลุ่มของอะตอมที่เป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุล เป็นตัวบอกสมบัติเฉพาะในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ รวมทั้งสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์เป็นไปตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารนั้น จึงอาจใช้หมู่ฟังก์ชันเป็นเกณฑ์ในการจำแนกสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆได้ (ณัฐพร เอี่ยมสะอาด, 2557)

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยมีแรงกระทำระหว่างตัวกลางดูดซับและมลสาร แต่อาจเกิดขึ้นอย่างไม่ทั่วถึงทั้งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ดังนั้นจึงมีการนำหมู่ฟังก์ชันซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวเหล่านี้ ไปทำการปรับแต่งพื้นผิวของวัสดุต่างๆเพื่อเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวลงไปบนวัสดุเหล่านั้น เช่น การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ เพื่อให้มีคุณสมบัติ ในการดูดซับมลสารแบบจำเพาะเจาะจง ซึ่งการดูดซับนั้นอาจเกิดเนื่องมาจากแรงทางประจุไฟฟ้า หรือปฏิกิริยาเคมี (Jutima Permrunguang, 2013; Jitsupa Suthkota, 2015)

2.10.1 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้แก่ตัวกลางดูดซับ และเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการเลือกดูดซับมลสารแต่ละชนิด ซึ่งการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวนี้นี้จะได้ผลดีเป็นพิเศษกับตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ที่มีลักษณะทางเคมีบนพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

2.10.1.1 การต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (Post-synthetic grafting)

การต่อติดหมู่ฟังก์ชันเป็นการนำหมู่ฟังก์ชันทางเคมี เช่น อะมิโน (เอมีน) เมอร์แคปโต และไฮดรอกซิล มายึดบนผิวของตัวกลางดูดซับแล้วต่อกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเดิม ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย และคงไว้ซึ่งโครงสร้างเดิมของตัวกลางดูดซับ การต่อติดหมู่ฟังก์ชันนี้มีข้อเสียคือ ยากที่จะควบคุมความเข้มข้น และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันที่ทำการต่อติดเข้าไป และการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเฉพาะบนพื้นผิวด้านนอก และภายในรูพรุนที่สารตัวกลางปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันสามารถเข้าถึงได้เท่านั้น อย่างไรก็ตามการต่อติดหมู่ฟังก์ชันก็มีข้อดีคือ จะยังรักษาโครงสร้างของตัวกลางดูดซับหลังจากที่ทำการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน

2.10.1.2 การควบแน่นร่วม (Co-condensation or Direct synthesis)

การควบแน่นร่วมเป็นการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไปพร้อมกับการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่สามารถใช้ได้กับทั้งหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ และอนินทรีย์ โดยมีข้อดีของการควบแน่นร่วมคือ เกิดการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอย่างทั่วถึงทั้งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ และสามารถรับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ได้มากกว่าวิธีการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ถึงแม้ว่าการควบแน่นร่วมนี้จะทำให้สูญเสียโครงสร้างของสารตั้งต้นไปบางส่วนเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของตัวกลางดูดซับใหม่

2.10.2 หมู่ฟังก์ชันเอมีน (Amine)

จากการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยการควบแน่นร่วมหมู่ฟังก์ชันเอมีนหรืออะมิโน หมู่ฟังก์ชันเอมีนมีคุณสมบัติเป็นด่าง ($\text{pH} = 8$) ขอบน้ำ มักนิยมใช้ในการนำมาปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับเพื่อเพิ่มความชอบน้ำ และทำให้พื้นผิวเป็นประจุบวก เนื่องจากเมื่อละลายน้ำจะได้รับโปรตอนจากน้ำ (วีรวัดน์ หาญอมรรุ่งเรือง, 2557)

ตารางที่ 2- 8 คุณสมบัติทั่วไปของหมู่ฟังก์ชันเอมีน

สมบัติ	หมู่ฟังก์ชันเอมีน
สูตรโครงสร้าง	R-NH ₂
pH PZC	8
ความเป็นกรด-ด่าง	ด่าง
คุณสมบัติความชอบน้ำ	ชอบน้ำ

(ที่มา: วีรวัฒน์ หาญอมรรุ่งเรือง, 2557)

2.11 การดูดซับ (Adsorption)

2.11.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 ภูมิภาค เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง โดยสารที่เกิดการดูดซับเรียกว่า “ตัวกลางดูดซับ” (Adsorbent) และสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ” (Adsorbate) การดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวกลางดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สำหรับการดูดซับระหว่างภูมิภาคของเหลว-ของแข็งนั้น ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอย สารจะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนตัวกลางดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวกลางดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวกลางดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.11.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบผันกลับได้สามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อน และไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น เช่น แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals force), แรงกระทำระหว่างโมเลกุลมีขั้วซึ่งมีไดโพลแบบถาวร (Dipole-dipole interaction), แรงกระทำที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วเหนี่ยวนำให้อะตอมหรือโมเลกุลอื่นมีขั้ว (Dipole-induce dipole interaction) หรือแรงลอนดอน (London

force) ที่เกิดขึ้นจากแรงระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วด้วยกัน โดยแรงดังกล่าวจะไม่มีพลังงานจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง มักจะเกิดในสภาวะอุณหภูมิต่ำๆและมีพลังงานการดูดซับต่ำ

2.11.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวกลางดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของตัวถูกดูดซับแล้วเกิดการจัดเรียงอะตอมขึ้นเป็นสารประกอบใหม่ที่มีพันธะเคมีที่แข็งแรงมากขึ้น โดยกระบวนการนี้จะมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่ามาก จึงเป็นการยากที่จะขจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวของตัวกลางดูดซับได้ การดูดซับทางเคมีจึงเป็นการดูดซับแบบขั้นเดียว

2.11.1.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Ion exchange adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวกลางดูดซับกับตัวถูกดูดซับ มีประจุที่ตรงข้ามกันหรือเกิดจากการแทนที่ของประจุระหว่างผิวของตัวกลางดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

2.11.1.4 การดูดซับแบบจำเพาะ (Specific Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวกลางดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง

2.11.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.11.2.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวกลางดูดซับในการดูดซับนั้น คือ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวกลางดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวกลางดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวกลางดูดซับได้ประสิทธิภาพการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับยังมีผลต่อการดูดซับด้วย เช่น หากขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้ารูพรุนตัวกลางดูดซับได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับต่ำลง

2.11.2.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถการดูดซับ เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความสามารถในการยึดติดผิวระหว่างสารและคาร์บอนลดลง อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นไหวของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับส่งผลให้เกิดการคายมลสารที่ถูกดูดซับ

2.11.2.3 ค่าพีเอชของสารละลาย

พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับเนื่องจากมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและความสามารถในการละลายของสารต่างๆจะมีผลต่อประจุของตัวกลางดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยทำให้แรงที่กระทำต่อกันระหว่างตัวกลางดูดซับกับตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสมบัติความเป็นประจุเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้นหรือแย่งลง หากมีประจุชนิดเดียวกับสารละลายทำให้เกิดแรงผลักที่สูงกว่าแรงดึงดูดอย่างแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนี้ยังทำให้การดูดซับบนพื้นผิวมีความหนาแน่นน้อยลง ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ

2.11.2.4 ชนิดของตัวทำละลาย

ตัวทำละลายแต่ละชนิดมีผลต่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างตัวกลางดูดซับและตัวถูกดูดซับ ต่างๆกัน โดยอิทธิพลของตัวทำละลายที่มีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุดังนี้

1. แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
2. แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างตัวทำละลายกับตัวกลางดูดซับ โดยแรงกระทำที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลายและตัวกลางดูดซับ
3. แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกละลายกับผิวของตัวกลางดูดซับ ตัวกลางดูดซับจำเป็นต้องแข่งขันกับตัวทำละลายในการดึงดูดตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับให้เกิดการเคลื่อนย้ายมาอยู่บนผิวของตัวกลางดูดซับจะส่งผลให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปโดยอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับแรงกระทำที่เกิดขึ้น

2.11.2.5 คุณสมบัติของตัวดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากขนาดที่เพิ่มขึ้น มักจะส่งผลให้เกิดการดูดซับมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ขนาดโมเลกุลจะถูกจำกัดด้วยขนาดของรูพรุนและโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับนั้น มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน

2.11.2.6 ความหลากหลายของมลสาร

การที่มีตัวถูกละลายที่สามารถถูกดูดซับได้มากกว่าหนึ่งชนิดส่งผลให้เกิดการแย่งชิงพื้นที่บนตัวกลางดูดซับแต่เนื่องจากพื้นผิวนั้นสามารถดูดซับตัวถูกละลายได้บางชนิดเท่านั้นจึงไม่จำเป็นว่าจะเกิดการแย่งชิงพื้นที่เดียวกัน อย่างไรก็ตามการที่มีตัวถูกละลายอื่นๆเพิ่มเข้ามาในระบบมักจะทำให้ความสามารถในการดูดซับตัวถูกละลายเดิมลดลง

2.11.2.7 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาสารดูดซับในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

2.11.3 ขั้นตอนของการดูดซับ

ขั้นตอนในการดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายตัวถูกละลาย (Adsorbate) ไปยังตัวกลางดูดซับ (Adsorbent) นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดโดยโมเลกุลของตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่จากของเหลว (Bulk Solution) ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวกลางดูดซับการขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวกลางดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุนชั้นตอนนี้จัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน
 4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลจะถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับนั้นผ่านปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและโครงสร้างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ
- อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลมีความสำคัญอย่างมากต่ออัตราการดูดซับ ถ้าอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลมีความรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น นอกจากนี้อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ

2.11.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption)

สมการที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับนั้นคือ จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second order kinetic) จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับมวลสารของตัวกลางดูดซับกับเวลา โดยทั่วไปแล้วอัตราการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการดูดซับจากนั้นอัตราการดูดซับจะลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมังคลา, 2555)

2.11.4.1 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic)

มีรูปแบบของสมการ ตามสมการที่ 2.1

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (2.1)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.1 ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการเส้นตรงของ Pseudo first order แสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.2)$$

- โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ต่อนาที)
 q_t คือ ปริมาณการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวกลางดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_e คือ ปริมาณการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวกลางดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t คือ ระยะเวลาของการดูดซับ (นาที)

2.11.4.2 จลนพลศาสตร์อันดับที่สองเสมือน (Pseudo second order kinetic)

มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.3

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (2.3)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.3 ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการเส้นตรงของ Pseudo second order แสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.4)$$

- โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)
 อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (h) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$h = k_2 q_e^2 \quad (2.5)$$

- โดยที่ h คือ อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที)
 ครึ่งเวลาของการดูดซับ (Half-adsorption time) คำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e} \quad (2.6)$$

- โดยที่ $t_{1/2}$ คือ ครึ่งเวลาของการดูดซับ (นาที)

2.11.4.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับศึกษาจากสมการ Intraparticle diffusion เขียนได้ดังสมการที่ 2.7

$$q_t = k_i t^{1/2} \quad (2.7)$$

โดยที่ k_i คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่

2.11.5 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

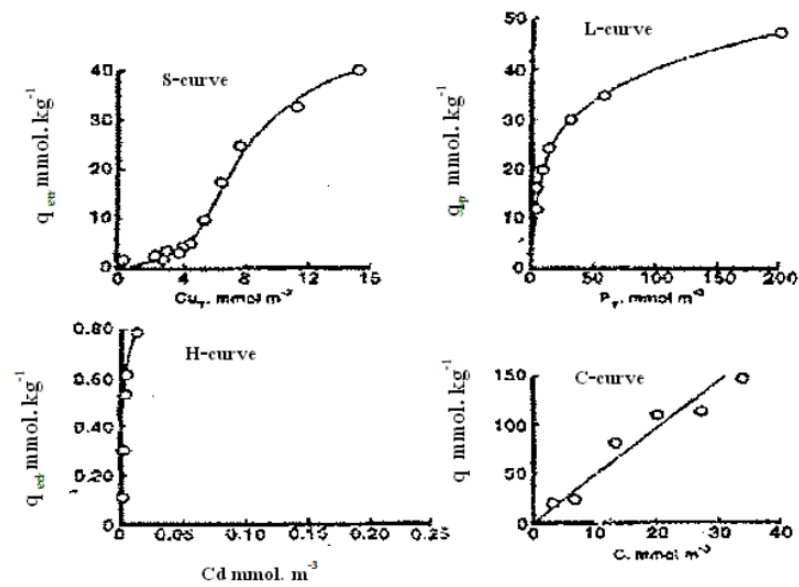
ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) หมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่ถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลโดยตัวถูกดูดซับมีหน่วยเป็นความเข้มข้น เมื่อมีสถานะเป็นของเหลวที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ หรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่งและจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวกลางดูดซับนั้นอ่อนลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อไปได้ก่อให้เกิดเป็นชั้นที่สองสามและสี่ต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว อาจจะมีการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้น ซ้อนสูงขึ้นไปรูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลายจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆจะมีการคายซับเกิดขึ้นพร้อมๆกัน จนในที่สุดจำนวนสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายซับจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรดเป็นด่างของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสารซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่ง

หน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (q_e) คำนวณได้จากสมการที่ 2.8 กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่

โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทอมใน 4 ลักษณะ คือ S, L, H, และ C ซึ่งสามารถจะจำแนกได้ด้วยลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทอมในรูปแบบต่างเช่น (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

1. S-curve Isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะต่ำ แล้วจะค่อยๆลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ในที่สุดก็จะลดลงและเป็นศูนย์เมื่อพื้นที่ว่างในการดูดซับของการดูดซับเต็ม ไอโซเทอมนี้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีแรงดึงดูด (Affinity) ต่อสารที่ถูกดูดซับต่ำแต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น
2. L-curve (Langmuir) Isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะสูงมากแล้วจะค่อยๆลดลงเมื่อความเข้มข้นสูง พฤติกรรมการดูดซับเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าสารดูดซับมีแรงดึงดูดหรือความสามารถในการดูดซับสารหรือไอออนในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำและจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ว่างในการดูดซับลดลง
3. H-curve (High affinity) Isotherm มีลักษณะความชันในช่วงเริ่มต้นจะสูงมากลักษณะดังกล่าวแสดงว่าสารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูง ซึ่งอาจจะเกิด Inner-sphere Complexation หรือเกิดปฏิกิริยาด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waals) ขึ้นในกระบวนการดูดซับมหาวิทยาลัย
4. C-curve Isotherm ความชันของกราฟนี้จะไม่แปรผันความเข้มข้นของสารละลายแสดงถึง Partitioning Mechanism ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับถูกทำให้แพร่กระจายหรือแยกออกกระหว่างบริเวณใกล้ผิวของสารดูดซับกับสารละลายโดยปราศจากพันธะจำเพาะใดๆ ระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ



รูปที่ 2- 4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบต่างๆ

(ที่มา: วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (2.8)$$

- โดยที่ q_e คือ ปริมาณการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_0 คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
- M คือ น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัม)

รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน ซึ่งขึ้นกับความเหมาะสมในการนำเอาสมการแบบใดมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm)

สมการไอโซเทอมซิปส์ (Sips Isotherm) และสมการไอโซเทอมเรดลิชและปีเตอร์สัน (Redlich and Peterson Isotherm) เป็นต้น

2.11.5.1 ไอโซเทอมแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

แลงเมียร์ได้เสนอแบบจำลองการดูดซับและการคายซับจากผิวของของแข็งเพื่ออธิบายการดูดซับเชิงปริมาณ (Quantitative) ไว้ ซึ่งแบบจำลองของ Langmuir นั้นถูกพัฒนาสำหรับการอธิบายการดูดซับเชิงเคมีแต่ก็มีการประยุกต์ไว้สำหรับการดูดซับเชิงกายภาพด้วย เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการดูดซับ ข้อมูลการดูดซับนิยมรายงานออกมาในรูปของไอโซเทอมการดูดซับตามสมการไอโซเทอมแลงเมียร์ (ศรีณย์ จิตตวนิชประภา, 2554)

สมมติฐานที่สำคัญของแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์คือ 1) การดูดซับเกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวเท่านั้น (Adsorption Site) 2) ณ พื้นที่นั้นตัวกลางดูดซับสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ได้กับมลสารเป้าหมายเท่านั้น 3) อนุภาคให้พลังงานในการดูดซับเท่ากันตลอดทุกตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ (ความแรงของการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของมลสารและตัวกลางดูดซับ) และ 4) อนุภาคที่ไม่มีแรงใด ๆ กระทำกันระหว่างตัวมลสารด้วยกันเอง

จากข้อกำหนดทั้ง 4 ข้อดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หมายความว่าในแต่ละตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ (Adsorption site) จะสามารถดูดซับมลสารได้เพียงชั้นเดียวและมีปริมาณพื้นที่จำเพาะจำกัดต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ ตัวกลางดูดซับ ดังนั้นย่อมความหมายว่าพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับเมื่อถูกปกคลุมด้วยมลสารทั้งหมดย่อมทำให้ ตัวกลางดูดซับสิ้นความสามารถในการดูดซับมลสารเพิ่มเติม ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยมีรูปแบบสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ดังสมการที่ 2.9

$$q_e = \frac{bq_m C_e}{(1 + bC_e)} \quad (2.9)$$

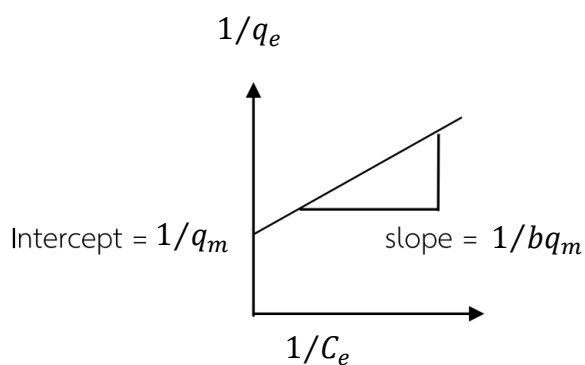
โดยที่	q_e	คือ ปริมาณการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_m	คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

จากสมการที่ (2.9) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{bq_m C_e} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่า $1/q_e$ และ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงรูปที่ 2-5 โดยค่า q_m และ b สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ (Slope) และ จุดตัดแกน y (Intercept) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/bq_m$ และ $1/q_m$ ตามลำดับ



รูปที่ 2- 5 กราฟแสดงไอโซเทอมแลงเมียร์
(ที่มา: Tien, 1994)

2.11.5.2 ไอโซเทอมฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

สมการไอโซเทอมฟรอนด์ลิชเป็นไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายสมดุลการดูดซับอีกชนิดหนึ่งซึ่งอธิบายการดูดซับบนสารดูดซับที่มีพื้นผิวของการดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) มีสมมุติฐานว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (ศรัณย์ จิตตวนิชประภา, 2554) ซึ่งฟรอนด์ลิชได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ที่สมดุลของการดูดซับดังนี้

$$q = K_f C_e^{1/n} \quad (2.11)$$

โดยที่ K_f คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ (Sorption Capacity)

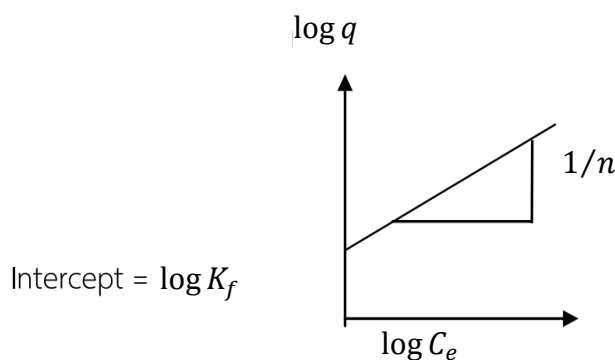
$1/n$ คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Adsorption Intensity)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการที่ (2.11) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ ลอการิทึม ได้ดังนี้

$$\log q = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่า $\log q$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2-6 โดยค่าความชันของกราฟ (Slope) และจุดตัดแกน y (Intercept) มีค่าเท่ากับ $1/n$ และ $\log K_f$ ตามลำดับ



รูปที่ 2- 6 กราฟแสดงไอโซเทอมฟรอนด์ลิช

(ที่มา: Tien, 1994)

2.11.5.3 ไอโซเทอมซิปส์ (Sips Isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่รวมไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชเข้าด้วยกันและมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าแลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช ไอโซเทอม ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในการดูดซับแบบชั้นเดียวและหลายชั้น โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.13

$$q_e = \frac{q_m K_s C_e^{1/n}}{1 + K_s C_e^{1/n}} \quad (2.13)$$

โดยที่ K_s คือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของซิปส์

2.11.5.4 ไอโซเทอมเรดลิชและปีเตอร์สัน (Redlich and Peterson Isotherm)

เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่ประกอบด้วย 3 ตัวแปร โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับแบบหลายชั้นเกิดขึ้นในช่วงแรกเท่านั้น ซึ่งการนำไอโซเทอมชนิดนี้ไปใช้ถูกจำกัดในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้นเนื่องจากความลำบากในการวิเคราะห์ค่าคงที่โดยรูปแบบของสมการไอโซเทอมการดูดซับของเรดลิชและปีเตอร์สัน แสดงดังสมการที่ 2.14

$$q_e = \frac{K_j C_e}{1 + b_j C_e^\beta} \quad (2.14)$$

โดยที่ K_j คือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเรดลิชและปีเตอร์สัน

b_j คือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเรดลิชและปีเตอร์สัน

β คือตัวประกอบความหลากหลายของพื้นผิว

2.12 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.12.1 การกำจัดสารตกค้างจากยาโดยโครงข่ายโลหะอินทรีย์

Bhadra และคณะ (2017) ศึกษาการนำโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด ZIF-8 มากำจัดสารตกค้างจากยาไดโคเฟนิแนคและไอบูโพรเฟนในสารละลาย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถ่านกัมมันต์ โดยมีการศึกษาพื้นที่ผิวในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ พบว่าพื้นที่ผิว BET ของ ZIF-8 และถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ 1,073 และ 1,036 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่า ZIF-8 มีความสามารถในการดูดซับไดโคเฟนิแนคและไอบูโพรเฟน 100 และ 28 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับไดโคเฟนิแนคและไอบูโพรเฟน 83 และ 110 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

2.12.2 การใช้โครงข่ายโลหะอินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับในวัฏภาคน้ำ

Patil และคณะ (2011) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเบนซีนในสารละลายโดยโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด MIL-53(AI) ทำการสังเคราะห์ MIL-53(AI) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มัลและทำการล้างโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่าพื้นที่ผิว BET 1,235 ตารางเมตรต่อกรัม (มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นเล็กน้อยโดยมีค่า 1,140 ตารางเมตรต่อกรัม (Phani และคณะ, 2010) ความสามารถในการดูดซับของ MIL-53(AI) ในการดูดซับไนโตรเบนซีนสูงสุดอยู่ที่ 610 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเข้าสู่สมดุลภายใน 20 นาที โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดด้วยแรงพาย-พายระหว่างไนโตรเบนซีนและตัวเชื่อมอินทรีย์ ซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำและในสภาวะที่เป็นต่างส่วนที่เป็นวงเบนซีนนั้นจะเต็มไปด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งเกิดการขัดขวางการดูดซับของไนโตรเบนซีน ความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นสูงสุดที่พีเอชเป็นกลาง ในทางตรงกันข้ามความสามารถในการดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุลลดลงเมื่ออุณหภูมิเกิน 50 องศาเซลเซียสและมีความสามารถในการดูดซับลดลงที่พีเอชมากกว่า 8 จลนพลศาสตร์การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบอัตราที่เกิดปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน โดยปริมาณของไนโตรเบนซีนที่บรรจุอยู่ภายในเกิดขึ้นโดยกระบวนการหายใจของ MIL-53(AI) อีกทั้ง MIL-53(AI) ยังสามารถคืนสภาพได้ถึง 3 ครั้ง เมื่อใช้เมทานอลเพื่อทำการคายซับไนโตรเบนซีน

Zhou และคณะ (2013) ศึกษาการสังเคราะห์ MIL-53(AI) ที่อุณหภูมิสูงโดยในส่วนของโลหะที่ในการสังเคราะห์นั้นใช้อลูมิเนียมเนื่องจากมีความเป็นพิษน้อยกว่า MIL ชนิดที่ใช้โครเมียมเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการดูดซับสารบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A: BPA) จากสารละลาย พบว่า

มีความสามารถในการดูดซับ BPA ที่ดีเยี่ยมเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนทั่วไป เช่น ถ่านกัมมันต์ เกรดการค้ามีความสามารถในการดูดซับ 129.6 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยพีเอชเหมาะสมในการกำจัด BPA คือพีเอชเท่ากับ 4 และที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในส่วนจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ มีความเหมาะสมกับจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเหมือน และการดูดซับเข้าสู่สมดุลในเวลา 90 นาที ไอโซเทอมในการดูดซับเมื่อพิจารณาจากค่า R^2 มีความเหมาะสมกับไอโซเทอม Redlich–Peterson ความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 329.2 ± 16.5 มิลลิกรัมต่อกรัม โดย MIL-53(AI) ในการศึกษาี้สามารถทำการคืนสภาพได้ง่ายโดยใช้การล้างด้วยเมทานอลเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งเมื่อผ่านการคืนสภาพ 3 ครั้งยังคงมีประสิทธิภาพร้อยละ 70 ถึง 80 โดยกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากปรากฏการณ์หายใจ (Breathing phenomena) ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างวงเบนซีนของ BPA และวงเบนซีนที่ไม่ชอบน้ำของตัวกลางดูดซับ อีกทั้งยังเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มฟินอลของ BPA และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_4$) บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

2.12.3 การดัดแปรหมู่ฟังก์ชันของโครงข่ายโลหะอินทรีย์

Hasan และคณะ (2013) ศึกษาการดูดซับโดยใช้โครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด MIL-101 และ MIL-101 ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (AMSA-MIL-101) และด่าง (ED-MIL-101) ในการดูดซับ นาพรอกเซน และ กรดคลอโรไฟบรีค กรดอะมิโนมีเทนซัลโฟนิค (Aminomethanesulfonic acid) และเอทิลีนไดอะมีน (ethylenediamine) ถูกใช้เป็นตัวเชื่อมในส่วนโลหะที่เปิดของโครงข่ายโลหะอินทรีย์ เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ($-SO_3H$) และด่าง ($-NH_2$) ตามลำดับ พบว่าพื้นที่ผิว BET ของ MIL-101, AMSA-MIL-101, ED-MIL-101, และถ่านกัมมันต์ มีค่า 3,014, 2,322, 2,555, และ 871 ตามลำดับ และความสามารถในการดูดซับสารตกค้างยานาพรอกเซนโดย MIL-101, AMSA-MIL-101, ED-MIL-101 และถ่านกัมมันต์ 131, 93, 154, และ 81 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสารตกค้างยากรดคลอโรไฟบรีค โดย MIL-101, AMSA-MIL-101, และ ED-MIL-101 มีค่า 315, 105, และ 347 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ โดยจากการศึกษาพบว่า MIL-101 ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันด่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดทั้งอัตราการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ ในทางกลับกัน MIL-101 ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันกรดมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องมาจากกลไกในการดูดซับอาจเกิดจาก

อันตรกิริยาของกรดและด่างระหว่างสารตกค้างจากยาและตัวกลางดูดซับ โดยมีผลของพีเอชต่อการดูดซับนาพรอกเซนสนับสนุนการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันต่างของโครงข่ายโลหะอินทรีย์สามารถคืนสภาพได้โดยล้างด้วยเอทานอล (ethanol) และสามารถใช้ซ้ำได้ถึง 3 ครั้งซึ่งประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ทั้งความสามารถในการดูดซับและความเร็วในการดูดซับ

Hasan และคณะ (2016) ศึกษาการกำจัดยาไดโคลฟีแนค โดยใช้โครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่มีโลหะเซอร์โคเนียม (Zr) เป็นพื้นฐาน ชนิด UiO-66 และ UiO-66 ที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันกลุ่มกรด (SO_3H : $\text{SO}_3\text{H}\text{-UiO-66}$) และด่าง (NH_2 : $\text{NH}_2\text{-UiO-66}$) ในการดูดซับ พบว่า UiO-66 และ UiO-66 ที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันกลุ่มกรดและด่างนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับไดโคลฟีแนคสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทั้งงานวิจัยในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ คือ 189, 263, 106, และ 76 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากขนาดรูพรุนของ UiO-66 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากรูพรุนของ UiO-66 นั้นมีขนาดเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ และเกิดการดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเกิดแรงแบบพาย-พาย ระหว่าง UiO-66 และไดโคลฟีแนคเป็นหลักและยิ่งไปกว่านั้นการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันกรด ทำให้เพิ่มความสามารถและอัตราเร็วในการดูดซับ และการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด่างให้ผลตรงกันข้ามเนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดแรงผลักรหว่างด่างและด่าง ระหว่าง NH_2 ของ $\text{NH}_2\text{-UiO-66}$ และ NH ของไดโคลฟีแนค นอกจากนี้การดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำโดย $\text{SO}_3\text{H}\text{-UiO-66}$ มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ถึง 13 เท่า

2.12.4 การกำจัดสารตกค้างจากร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

Torrellas และคณะ (2016) ศึกษาการกำจัดคาเฟอีน (Caffeine) ในน้ำเสียทางเภสัชกรรมและสารอินทรีย์ละลายน้ำ (NOM) โดยกระบวนการดูดซับ งานวิจัยนี้ศึกษาถึงอิทธิพลของสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) และการดูดซับคาเฟอีนร่วมกับ NOM ในน้ำเสียทางเภสัชกรรม ประสิทธิภาพการทำงานของถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก, Calgon F400, สังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดกลางจากหินพิซและซีพีโอไลต์ในเชิงพาณิชย์ใช้ในการกำจัด NOM ของน้ำทิ้งจากโรงบำบัดน้ำเสียและการแข่งขันการดูดซับระหว่างคาเฟอีนและ NOM ได้รับการพิสูจน์ว่าโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กของตัวกลางดูดซับมีผลต่อการดูดซับ NOM การมีอยู่ของ NOM ในสารละลายในน้ำส่งผลทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากการแทนที่

ของ NOM บนตัวกลางดูดซับจึงทำให้เกิดการแข่งขันระหว่างสารเป้าหมาย (Target compound) และ NOM

Li และคณะ (2017) ศึกษาการกำจัดยาต้านจุลชีพ ไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin, CIP) โดยใช้วัสดุดูดซับนาโนพอร์สคาร์บอน (NPC) ที่ได้มาจากการทำคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) โครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด Zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) ซึ่งมีการศึกษาผลของกรดฮิวมิก (Humic acid: HA) ที่มีผลต่อการดูดซับ CIP พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ HA 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับ CIP เพิ่มขึ้นจาก 120 มิลลิกรัมต่อกรัมเป็น 140 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น HA สูงขึ้นตั้งแต่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรจนถึง 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับ CIP คงที่ที่ความสามารถในการดูดซับ 140 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจาก NPC เป็นวัสดุที่ได้มาจาก ZIF-8 และ HA สามารถถูกดูดซับโดยวัสดุที่มีพื้นฐานคาร์บอน ซึ่งการดูดซับเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและหมู่เอมีนของ CIP ส่งผลให้การดูดซับ CIP เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของ HA ส่งผลให้ NPC มีความสามารถต่ำ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ HA นั้นไม่เป็นประโยชน์และไม่เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้กับตัวกลางดูดซับ NPC โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่เป็นกลางคือที่พีเอช 6 โดยขณะที่ไม่มี HA ในสารละลาย NPC มีความสามารถในการดูดซับ CIP มีค่า 416.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เกิดการดูดซับด้วยอันตรกิริยาหลักคือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์และแรงไฮโดรโฟบิก ในการดูดซับ CIP

Wang และคณะ (2018) ศึกษาการแข่งขันการดูดซับระหว่างสารกลุ่มผลิตภัณฑ์ยาและผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล (PPCP) และฮิวมิก (HA) โดยท่อนานาโนคาร์บอนเมมเบรน (CNT) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการพบสารอินทรีย์ละลายน้ำ (NOM) และ PPCP มีการแข่งขันกันเกิดขึ้น การดูดซับโดยใช้ CNT พบว่า NOM ส่งผลให้การดูดซับ PPCP โดย CNT มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษา PPCP ประกอบด้วย 4 ชนิด คือ อะเซตามิโนเฟน (Acetaminophen: AAP), คาเฟอีน (Caffeine: CAF), ไตรโคลซาน (Triclosan: TCS), และคาร์เบนดาซิม (Carbendazim: CBD) ยาทั้ง 4 ชนิดใช้ในการศึกษาการแข่งขันการดูดซับระหว่างยาและ NOM ในการแข่งขันการดูดซับนั้นไม่ใช่เพียงส่วนประกอบของ NOM ที่มีผลต่อการดูดซับ แต่คุณสมบัติของยาก็มีผลต่อการดูดซับเช่นเดียวกัน เมื่อมี HA อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาทั้งหมดของยาทุกชนิดพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงทั้งหมด คือ AAP, TCS, และ CBD

ประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 46–57, 45–48, และ 23–79 ตามลำดับ ยกเว้น CAF เนื่องจาก CAF นั้นอยู่ในรูปที่มีประจุเป็นบวกที่พีเอช 7 ถึง 8.3 ซึ่งเกิดการดูดซับกับ CNT ด้วยแรงพาย-พายและการส่งผลของ NOM ต่อการดูดซับเกิดขึ้นอย่างอ่อน ในส่วนของยา AAP, TCS, และ CBD นั้นที่พีเอช 7, 8.27, และ 8.14 พบว่าอยู่ในรูปประจุเป็นกลางและเกิดอันตรกิริยาในการดูดซับคือ พันธะไฮโดรเจน, แรงพาย-พาย, และแรงพาย-พาย ตามลำดับ ซึ่ง NOM ส่งผลต่อการดูดซับเป็นอย่างมาก

2.13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าได้มีการนำวัสดุดูดซับต่างๆมาใช้ในการดูดซับสารตกค้างจากยาในกลุ่มยาแก้ปวดและยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ (NSAIDs) รวมถึงวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดต่างๆไม่ว่าจะเป็น MIL-101, ZIF-8, และ UiO-66 พบว่าวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์นั้นมีความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางดูดซับชนิดอื่นๆ แต่ในปัจจุบันยังไม่มี การศึกษานำ MIL-53(AI) มาใช้ในการดูดซับสารตกค้างจากยามากนัก โดยการศึกษาที่ผ่านมาที่ เกี่ยวข้องกับการดูดซับโดยใช้ MIL-53(AI) นิยมใช้ในการดูดซับในสถานะแก๊ส อีกทั้งยังมีการศึกษาที่ใช้ MIL-53(AI) รวมถึง MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันที่นำมาเป็นวัสดุดูดซับในของเหลวไม่มาก โดยมีงานวิจัยที่ทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนในโครงข่ายโลหะอินทรีย์หลายชนิด ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเอมีน เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นด่างส่งผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับยาเพิ่มขึ้น จากการศึกษาวิจัยที่ ผ่านมานิยมศึกษาการดูดซับยาในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ในสถานะจริงในการกำจัดสารตกค้างยาใน น้ำเสียนั้นพบว่ามีสารอินทรีย์ละลายน้ำอื่นๆประกอบอยู่ด้วย และสารอินทรีย์ละลายน้ำนั้นส่งผลต่อ ประสิทธิภาพในการดูดซับ จึงมีจำเป็นต้องมีการศึกษาการกำจัดสารตกค้างจากร่วมกับสารอินทรีย์ ละลายน้ำ

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3- 1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	เกรด	บริษัท
1.	2-อะมิโนกรดเทเรพทาลิก ($\text{NH}_2\text{-H}_2\text{BDC}$)	>98.5 %	TCI
2.	กรดกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)	Analytical	Qrec
3.	กรดเทเรพทาลิก (H_2BDC)	98 %	Sigma Aldrich
4.	กรดออร์โทฟอสฟอริก ร้อยละ 85	Analytical	Emsure
5.	กรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 37 (HCl)	Analytical	CARLO ERBA
6.	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	Analytical	Emsure
7.	คีโตโพรเฟน	>98.5 %	Sigma Aldrich
8.	ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	Analytical	Univar
9.	ไดเมทิลฟอร์มามิด (DMF)	Analytical	RCI Labscan
10.	ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal)	98 %	Sigma Aldrich
11.	นาพรอกเซน	99.9 %	Sigma Aldrich
12.	โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	Analytical	Volchem
13.	เมทานอล	Analytical	RCI Labscan
14.	อลูมิเนียมไนเตรทนาโนไฮเดรต	>98 %	Sigma Aldrich
15.	อะซิโตน (Acetone)	HPLC	RCI Labscan
16.	อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile)	HPLC	RCI Labscan
17.	เอทานอล	Analytical	RCI Labscan
18.	ไอบูโพรเฟน	99.9 %	Sigma Aldrich
19.	เฮกเซน (Hexanes)	Analytical	Macron

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. Solid phase extraction (SPE)
2. เครื่องเขย่า
3. เครื่องแยกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยงเซนทริฟิวส์ (Centrifuges)
4. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) (Agilent, USA)
5. เครื่องกวนแม่เหล็ก
6. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. เครื่องวัดพีเอช
8. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC)
9. ไซริงค์ฟิเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร)
10. กระดาษกรอง GF/F (ขนาด 0.7 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร, Whatman)
11. กระดาษกรองชนิดไนลอน (ขนาด 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร)
12. กระบอกฉีดยาขนาด 3 มิลลิลิตร
13. ขวดฉีดสารตัวอย่าง ขนาด 2 มิลลิลิตร
14. คอลัมน์ C18 (C18 4.6 x 250 มิลลิเมตร (5 ไมครอน), Cosmosil, Japan)
15. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
16. ตู้อบ
17. บีกสุญญากาศ
18. เครื่องระเหยสารแบบหมุน (Rotavapor R-250, BUCHI)
19. Cartridge HLB Plus (ปริมาณ 225 มิลลิกรัม 60 ไมครอน, Oasis)

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ MIL-53(Al) และ MIL-53(Al) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน (NH₂-MIL-53(Al))

3.2.1.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ MIL-53(Al)

การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ MIL-53(Al) โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง (ดัดแปลงวิธีการสังเคราะห์จากการศึกษาของ Sánchez-Sánchez และคณะ (2015))

1. ทำการเตรียมสารละลาย Al³⁺ โดยละลายอลูมิเนียมไนเตรทนาโนไฮเดรต (Al(NO₃)₃·9H₂O) 0.08 โมลในน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร โดยจะได้สารละลายใสไม่มีสี
2. ทำการเตรียมสารละลายตัวเชื่อมอินทรีย์โดยทำการละลาย กรดเทเรพทาลิก (H₂BDC) 0.04 โมล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.08 โมล ในน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร โดยจะได้สารละลายใสไม่มีสี
3. ทำการผสมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยเติมสารละลายตัวเชื่อมอินทรีย์ลงในสารละลาย Al³⁺อย่างช้าๆ และมีการบ่มจนตลอดเวลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4. เมื่อครบเวลาทำการหยุดปฏิกิริยาด้วยการปั่นเหวี่ยง โดยปั่นเหวี่ยง 12,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
5. นำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง
6. ทำการรีฟลักซ์โดยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เป็นเวลา 1 วัน
7. ทำการแช่ล้างในเมทานอล จากนั้นทำแห้งผลึก และบดให้เป็นผง
8. จากนั้นทำการแคลไซด์ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

3.2.1.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ NH₂-MIL-53(Al)

การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ NH₂-MIL-53(Al) โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง (ดัดแปลงวิธีการสังเคราะห์จากการศึกษาของ Sánchez-Sánchez และคณะ (2015))

1. ทำการเตรียมสารละลาย Al³⁺ โดยละลายอลูมิเนียมไนเตรทนาโนไฮเดรต (Al(NO₃)₃·9H₂O) 0.08 โมลในน้ำกลั่น 240 มิลลิลิตร โดยจะได้สารละลายใสไม่มีสี

2. ทำการเตรียมสารละลายตัวเชื่อมอินทรีย์โดยทำการละลาย 2-อะมิโนกรดเทเรพทาลิก ($\text{NH}_2\text{-H}_2\text{BDC}$) 0.04 โมล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.08 โมล ในน้ำกลั่น 240 มิลลิลิตร โดยจะได้สารละลายมีสีเหลืองใส
3. ทำการผสมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายตัวเชื่อมอินทรีย์ลงในสารละลาย Al^{3+} อย่างช้าๆ และมีการปั่นกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 4 วัน ที่อุณหภูมิห้อง จะได้สารละลายผสมมีสีเหลืองใส
4. เมื่อครบเวลาทำการหยุดปฏิกิริยาด้วยการปั่นเหวี่ยง โดยปั่นเหวี่ยง 12,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
5. นำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง
6. ทำการรีฟลักซ์โดยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เป็นเวลา 1 วัน
7. ทำการแช่ล้างในเมทานอล จากนั้นทำแห้งผลึก และบดให้เป็นผง
8. จากนั้นทำการแคลไซต์ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวกลางดูดซับ MIL-53 และ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(AU)}$

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวกลางดูดซับจากขั้นตอนข้างต้นตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3- 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวกลางดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
โครงสร้างผลึก	X-Ray Diffractometer (XRD)
พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	N_2 adsorption isotherm using BET theory
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
ปริมาณไนโตรเจน	CHNS/O Analyzer
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscopy (SEM)
ประจุบนพื้นผิว	Nanosizer

3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้ Cu K α radiation (40 kV, 100 mA, $2\theta = 5-70$ องศา และ $\lambda = 0.15406$ นาโนเมตร) (Zhou และคณะ, 2013)

3.2.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน วิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน โดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และสมการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ในการวิเคราะห์ขนาดและปริมาตรรูพรุน

3.2.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR) วิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปในช่วงสเปกตรัม 400 – 4,000 ต่อตารางเซนติเมตร

3.2.2.4 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ใช้บริการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุไนโตรเจนของหมู่เอมีนที่อยู่บนพื้นผิวของโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Thermo Scientific™ รุ่น FLASH 2000 ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2.5 การศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวกลางดูดซับ

วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานพื้นผิวและองค์ประกอบที่พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2.2.6 การศึกษาประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pzc)

นำน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 10 มิลลิลิตร มาปรับความเป็นกรด-ด่าง ให้อยู่ในช่วงพีเอช 3.0 ถึงพีเอช 12.0 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ วัดความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นโดยใช้พีเอชมิเตอร์ จากนั้นนำตัวกลางดูดซับปริมาณ

0.01 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) ภายหลังจากการเขย่า จากนั้นนำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (pH) และศักย์ไฟฟ้า หาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวกลางดูดซับ

3.2.3 การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM)

ทำการศึกษาการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการแยก (Fractionation) โดยเรซิน (Resin DAX-8) ในน้ำทิ้งจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ โดยแยกสารอินทรีย์ละลายน้ำ ออกเป็น 2 กลุ่มคือ สารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มที่ชอบน้ำ (HPI) และสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (HPO)

3.2.3.1 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างน้ำใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (Grab sampling) โดยกรองตัวอย่างน้ำที่จะทำการวิเคราะห์ FEEM ทันทีด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/F ขนาดตากรอง 0.7 ไมครอน เก็บตัวอย่างในขวดสีชา ส่วนตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ TOC ให้เก็บเหมือนวิธีการเก็บ FEEM ตัวอย่างสำหรับตัวอย่าง TOC ให้เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) ให้มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2 ตัวอย่างทั้งหมดเก็บรักษาโดยแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและเก็บตัวอย่างในที่มืด

3.2.3.2 ขั้นตอนการเตรียมเรซินสำหรับกระบวนการ Resin Fractionation

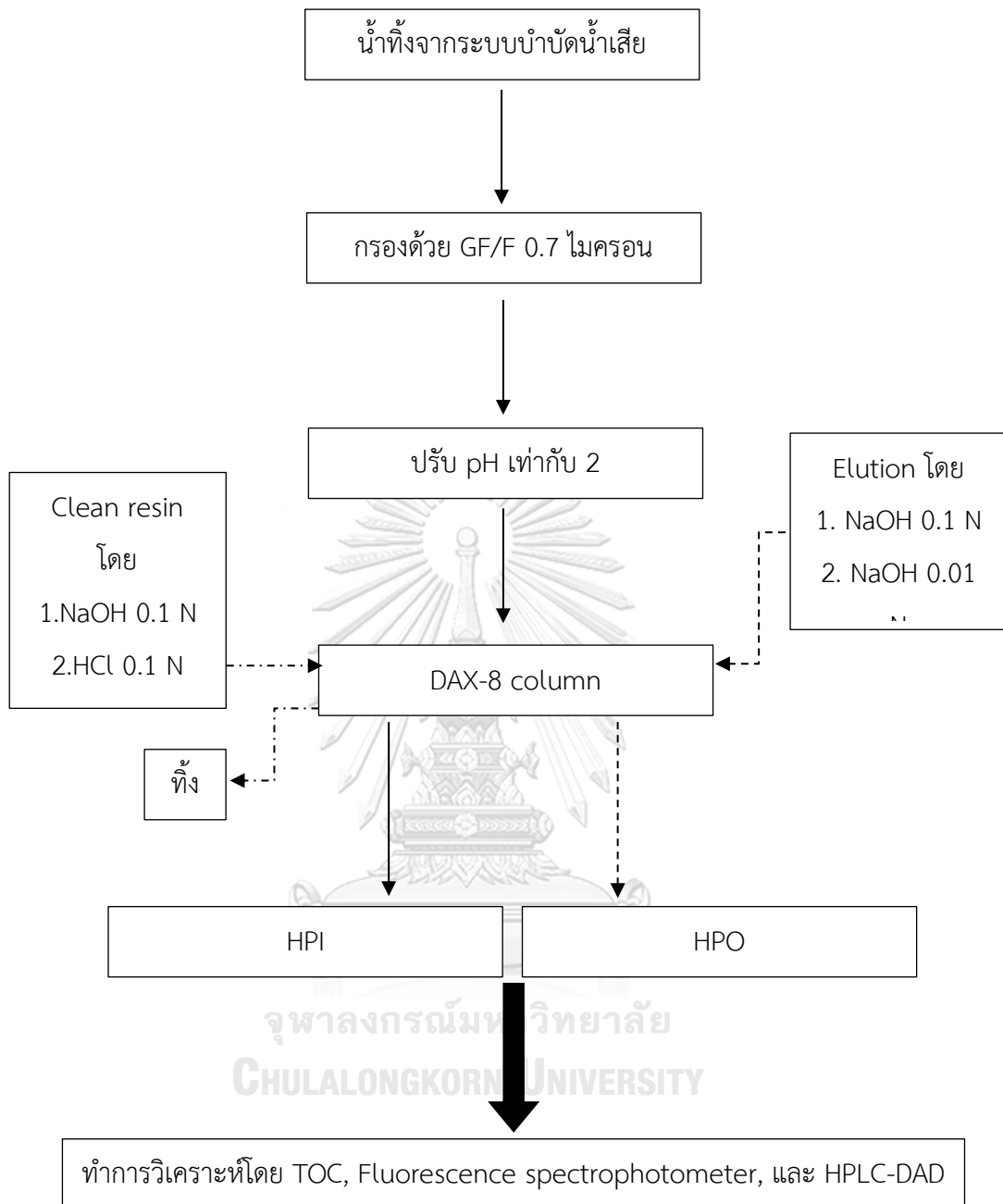
การเตรียมเรซินเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการ Resin fractionation เพื่อแยกสารอินทรีย์ ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ HPO และ HPI โดยใช้เรซินชนิด DAX-8 โดยเรซินชนิด DAX-8 เป็นเรซินที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.6 ขั้นตอนในการล้างเรซิน DAX-8 เริ่มจากการนำเรซินมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซินมาทำความสะอาดโดยใช้เครื่องมือ Soxhlet extraction โดยใช้ Acetone และ Hexane กลับทำความสะอาดเรซินอย่างละ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซินที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาแช่ในเมทานอลเพื่อรักษาสภาพ

3.2.3.3 ขั้นตอนการบรรจุเรซิน DAX-8

นำเรซินไปใส่ในคอลัมน์ (ขนาด 2.5×120 cm) ที่มี Glass wool บรรจุอยู่ โดย Glass wool ต้องผ่านการทำความสะอาดด้วยเมทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำมาบรรจุในคอลัมน์ เมื่อบรรจุเรซินลงในคอลัมน์เรียบร้อยแล้วจึงล้างเรซินด้วย NaOH เข้มข้น 0.1 นอร์มัล และ HCl เข้มข้น 0.1 นอร์มัล เป็นปริมาณเท่ากับ 2.5 เท่า bed volume ตามลำดับ ส่วนในขั้นตอนสุดท้ายจะนำเรซินมาล้างด้วยน้ำ Milli-Q จนกระทั่งมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า 10 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) และมีค่า TOC ต่ำกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (จรงค์พันธ์ มุสิกวงษ์, 2555)

3.2.3.4 ขั้นตอนการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการ Resin Fractionation

นำน้ำตัวอย่างมา 5 ลิตร และทำการกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาด 0.7 ไมครอน และกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมครอน จากนั้นปรับพีเอชเป็น 2 ด้วย H_2SO_4 เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการ Fraction แยกสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI ด้วยเรซินชนิด DAX-8 ที่บรรจุในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ โดยให้มีอัตราเร็วในการไหลผ่านเรซินต่ำกว่า 12 bed volumes/hr น้ำส่วนที่ไหลผ่านเรซิน DAX-8 ส่วนแรกจะเป็นส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI จากนั้นล้างเรซินด้วยน้ำ Milli-Q เป็นปริมาณ 1 bed volumes และปล่อยทิ้งจากนั้นเติมสารละลาย NaOH 0.1 นอร์มัล ปริมาณเท่ากับ 0.25 bed volumes และ NaOH 0.01 นอร์มัล ปริมาณเท่ากับ 1.25 bed volumes ปล่อยให้ไหลผ่านเรซินด้วยความเร็วไม่เกิน 2 bed volumes/hr จะได้ส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้ง 2 ส่วน โดย TOC, Fluorescence spectrophotometer, และ HPLC-DAD โดยจะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3- 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษาคูณลักษณะของน้ำทิ้งทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะของสารอินทรีย์

3.2.3.5 ขั้นตอนการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการระเหยแห้ง (Evaporation)

นำน้ำตัวอย่างมาทำการกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาด 0.7 ไมครอน และกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมครอน จากนั้นน้ำเข้าเครื่องระเหยสารแบบหมุน (Rotavapor R-250, BUCHI) เมื่อของเหลวภายในโถทำแห้งระเหยหมดแล้ว นำน้ำกลั่นละลายชะละลายส่วนที่แห้งภายในโถออกมา จากนั้นทำการแยกส่วนของเหลวและตะกอนด้วยเครื่องแยกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยงเซนทริฟิวส์ (Centrifuges) นำส่วนที่เป็นของเหลวทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นและชนิดของสารอินทรีย์ละลายน้ำ โดย TOC, Fluorescence spectrophotometer (FEEM), และ HPLC-DAD โดยจะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3- 2 เครื่องระเหยสารแบบหมุน

3.2.4 การศึกษากระบวนการดูดซับ

3.2.4.1 การเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock solution)

สารละลายยามาตรฐานเข้มข้นยาเตรียมโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายสำหรับคีโตโพรเฟน และเมทานอลเป็นตัวทำละลายสำหรับนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน โดยจะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยไม่ให้โดนแสง

3.2.4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

พารามิเตอร์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3- 3 พารามิเตอร์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

พารามิเตอร์	ค่าต่างๆของตัวกลางดูดซับ		
	MIL-53(AI)	NH ₂ -MIL-53(AI)	PAC
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	100 มิลลิกรัมต่อลิตร		
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้าง จากยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว	(KET/ IBU / NPX) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร		
เวลาเข้าสู่สมดุล	0-24 ชั่วโมง		
ความแรงของไอออน	0.01 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่พีเอช 7		
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส		
การปั่นกววน	200 รอบต่อนาที		

การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ ศึกษาโดยใช้สารตกค้างจากยาน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วยคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC โดยใช้ตัวกลางดูดซับปริมาณ 10 มิลลิกรัม ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 โมลาร์ พีเอช 7 ตัวอย่างถูกเขย่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปั่นกววน 200 รอบต่อนาที โดยทำการเก็บตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง

จากนั้นเมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้ทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำตัวอย่าง โดยใช้ไซริงค์ฟิลเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร) ปริมาณความเข้มข้นสารตกค้างจากยาที่หลงเหลือทำการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC-DAD) โดยจะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์ ผลการทดลองจะถูกนำมาคำนวณและสร้างกราฟระหว่างเวลาในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับที่เวลานั้นๆ

3.2.4.3 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์

พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3- 4 พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลายสูง

พารามิเตอร์	ค่าต่างๆของตัวกลางดูดซับ		
	MIL-53(AI)	NH ₂ -MIL-53(AI)	PAC
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	100 มิลลิกรัมต่อลิตร		
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว	(KET / NPX / IBU) 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร		
เวลาเข้าสู่สมดุล	ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุล ที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ		
ความแรงของไอออน	0.01 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ พีเอช 7		
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส		
การปั่นกววน	200 รอบต่อนาที		

การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ ศึกษาโดยใช้สารตกค้างจากยาน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วยคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ได้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์ ระหว่าง 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC โดยใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 10 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิตร ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 โมลาร์ พีเอช 7 ตัวอย่างถูกปั่นกววน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อถึงเวลา ณ จุดสมดุล ทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำตัวอย่าง โดยใช้ไซริงค์ฟิลเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร) ปริมาณความเข้มข้นสารตกค้างจากยาที่หลงเหลือทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง

โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC-DAD) โดยจะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์ ผลการทดลองจะถูกนำมาคำนวณและสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นที่จุดสมดุลและความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล

3.2.4.4 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำในน้ำเสียสังเคราะห์

พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำแสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3- 5 พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลายต่ำ

พารามิเตอร์	ค่าต่างๆของตัวกลางดูดซับ		
	MIL-53(AI)	NH ₂ -MIL-53(AI)	PAC
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	ตัวกลางดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับ 2, 5, 7, 10, และ 12 มิลลิกรัม		
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้าง จากยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว	(KET / NPX / IBU) 100 ไมโครกรัมต่อลิตร		
เวลาเข้าสู่สมดุล	ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุล ที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ		
ความแรงของไอออน	0.01 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่พีเอช 7		
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส		
การปั่นกว	200 รอบต่อนาที		

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วยคิโตโปรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนที่ความเข้มข้นต่ำคือ ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาตัวกลางดูดซับและสารตกค้างจากยาที่มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการทดลองข้างต้น ใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับที่แตกต่างกันคือ 2, 5, 7, 10, และ 12 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 โมลาร์ พีเอช 7 ตัวอย่างถูกปั่นกว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อถึงเวลา ณ จุดสมดุลทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำตัวอย่าง โดยใช้ไซริงค์ฟิลเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร) จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์โดย Solid phase extraction

(SPE) ปริมาณความเข้มข้นสารตกค้างจากยาที่หลงเหลือทำการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC-DAD) โดยจะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์

3.2.4.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูง

พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูงแสดงในตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3- 6 พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูง

พารามิเตอร์	ค่าต่างๆของตัวกลางดูดซับ		
	MIL-53(AI)	NH ₂ -MIL-53(AI)	PAC
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	100 มิลลิกรัมต่อลิตร		
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม	(KET + NPX + IBU) 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร		
เวลาเข้าสู่สมดุล	ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุล ที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ		
ความแรงของไอออน	0.01 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ พีเอช 7		
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส		
การปั่นกววน	200 รอบต่อนาที		

การดูดซับแบบคัดเลือกทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่มีทั้งสารตกค้างจากยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC ในการทำการทดลองทำในสภาวะเดียวกันกับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 10 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิตร ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01 โมลาร์ พีเอช7 ตัวอย่างถูกปั่นกววน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อถึงเวลา ณ จุดสมดุล ทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำตัวอย่าง โดยใช้ไซริงค์ฟิลเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร) ปริมาณความเข้มข้นสารตกค้างจากยาที่หลงเหลือทำการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC-DAD) โดย

จะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์ ผลการทดลองจะถูกนำมาคำนวณ และสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นที่จุดสมดุล และความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล

3.2.5 การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยา ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

3.2.5.1 การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำแสดงในตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3- 7 พารามิเตอร์การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับ DOM

พารามิเตอร์	ค่าต่างๆของตัวกลางดูดซับ		
	MIL-53(AI)	NH ₂ -MIL-53(AI)	PAC
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	100 มิลลิกรัมต่อลิตร		
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	DOM (ตามสมบัติของน้ำเสีย) + KET / NPX / IBU HPI (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) + KET / NPX / IBU HPO (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) + KET / NPX / IBU (KET / NPX / IBU : 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร)		
เวลาเข้าสู่สมดุล	ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุล ที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ		
ความแรงของไอออน	ตามสมบัติของน้ำเสีย		
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส		
การปั่นกว	รอบต่อนาที		

การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำศึกษาโดยใช้สารตกค้างจากยา ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM), สารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มที่ชอบน้ำ (HPI), และสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (HPO) โดยนำสารละลายเข้มข้น คีโตโพรเฟน หรือนาพรอกเซน หรือไอบูโพรเฟน ทำให้เจือจางในสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้ง 3 ชนิด ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาใน ระหว่าง 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC โดยใช้

ปริมาณตัวกลางดูดซับ 10 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตัวอย่างถูกปั่นกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อถึงเวลา ณ จุดสมดุล ทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำ ตัวอย่าง โดยใช้ไซริงค์ฟیلเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร) ปริมาณความเข้มข้นสารตกค้างจากยาที่หลงเหลือทำการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลว สมรรถนะสูง (HPLC-DAD) โดยจะมีการอธิบายในส่วนของวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง จากนั้น นำข้อมูลมาคำนวณและสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นที่จุดสมดุลและความสามารถในการดูดซับ ที่จุดสมดุล

3.2.5.2 การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

พารามิเตอร์ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำแสดงในตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3- 8 พารามิเตอร์การศึกษาการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับ DOM

พารามิเตอร์	ค่าต่างๆของตัวกลางดูดซับ		
	MIL-53(AI)	NH ₂ -MIL-53(AI)	PAC
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	100 มิลลิกรัมต่อลิตร		
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ	DOM (ตามสมบัติของน้ำเสีย) + KET + NPX + IBU HPI (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) + KET + NPX + IBU HPO (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) + KET + NPX + IBU (KET + NPX + IBU : 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร)		
เวลาเข้าสู่สมดุล	ณ เวลาที่เข้าสู่สมดุลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ		
ความแรงของไอออน	ตามสมบัติของน้ำเสีย		
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส		
การปั่นกวน	200 รอบต่อนาที		

การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำศึกษาโดยใช้สารตกค้างจากร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM), สารอินทรีย์ละลายน้ำ

กลุ่มที่ชอบน้ำ (HPI), และสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (HPO) โดยนำสารละลายเข้มข้น คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ทำให้เจือจางในสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้ง 3 ชนิด ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตกค้างจากยาในระหว่าง 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC โดยใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 10 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตัวอย่างถูกปั่นกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อถึงเวลา ณ จุดสมดุล ทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำตัวอย่าง โดยใช้ไซริงค์ฟิลเตอร์ชนิดไนลอน (0.22 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร) ปริมาณความเข้มข้นสารตกค้างจากยาที่หลงเหลือทำการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC-DAD) ผลการทดลองจะถูกนำมาคำนวณและสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นที่จุดสมดุล และความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล

3.2.6 วิธีการวิเคราะห์

3.2.6.1 การการตรวจวิเคราะห์ปริมาณยาในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ

การการตรวจวิเคราะห์ปริมาณยาในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำโดยการทำ Solid Phase Extraction (SPE) ใช้ Cartridge HLB Plus (ปริมาณ 225 มิลลิกรัม 60 ไมครอน, Oasis) ทำการล้าง Cartridge ด้วยเมทานอล 20 มิลลิลิตร ด้วยอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที ตามด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร จากนั้นใส่สารละลายตัวอย่างลงใน Cartridge หลังจากนั้นล้าง Cartridge ด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นำ Cartridge ระบายแห้งโดยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที และทำการชะละลายด้วยเมทานอล 10 มิลลิลิตร ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาทีและนำสารละลายตัวอย่างทำให้แห้งอีกครั้งโดยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการปรับปริมาตรตัวอย่างด้วยเมทานอลให้เป็น 0.5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดปริมาณความเข้มข้นยาที่คงเหลือตามวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณยาในสารละลาย

3.2.6.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณยาในสารละลาย

ความเข้มข้นของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นเมื่อเข้าสู่สมดุลของสารละลายยาแบบเดี่ยวและแบบผสมตรวจวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นโดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงเครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิด Diode

array detector (HPLC-DAD) รุ่น Agilent 1100 HPLC ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สำหรับ คีโตโพรเฟน และความยาวคลื่น 230 นาโนเมตรสำหรับนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน โดยสภาวะที่ใช้ ในการตรวจวัดอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โครมาโทกราฟแบบผันกลับ วัฏภาคหนึ่งใช้คอลัมน์ C18 (4 มิลลิเมตร 250 มิลลิเมตร 5 ไมครอน ยี่ห้อ Cosmosil ประเทศญี่ปุ่น) วัฏภาคเคลื่อนที่ใช้อัตราส่วน ร้อยละ 70:30 ปริมาตรต่อปริมาตรคือ อะซิโตไนไตรล์ และกรดออร์โทฟอสฟอริก 0.01 โมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรการฉีดสารตัวอย่าง 40 ไมโครลิตร อัตราเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที ในกรณีการ ตรวจวัดปริมาณยาในสารอินทรีย์ละลายน้ำใช้วัฏภาคเคลื่อนที่ใช้อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ปริมาตรต่อ ปริมาตร และในกรณีการตรวจวัดสารละลายยาในผลสารผสมใช้วัฏภาคเคลื่อนที่ใช้อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ปริมาตรต่อปริมาตร (ร้อยละอัตราส่วนวัฏภาคเคลื่อนที่คือ อะซิโตไนไตรล์ และกรดออร์โท ฟอสฟอริก 0.01 โมลาร์ ตามลำดับ)

3.2.6.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ

การตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำใช้วิธี High Temperature Catalytic Oxidation โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม Total organic carbon (TOC) รุ่น TOC-L CPH/CPN, SSM ยี่ห้อ Shimadzu กำหนดค่าการตรวจวัดด้วยวิธี TOC-diff ฉีดตัวอย่าง ครึ่งละ 500 ไมโครลิตร ทำการตรวจวัดอย่างน้อย 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง

3.2.6.4 การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

การตรวจวัด FEEM ตัวอย่างด้วยเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer โดยคำสั่ง 3D Fluorescence Measurement Program กำหนดค่าความยาวคลื่น Excitation และ Emission ที่จะตรวจวัดไว้ระหว่าง 220-550 นาโนเมตร และตั้งค่า Band width ที่ 5 นาโนเมตร ความเร็ว ในการตรวจวัด 1,000 นาโนเมตรต่อวินาที ใช้คิวเวตต์ที่ทำจาก Quartz ขนาด 1 เซนติเมตร ในการตรวจวัด โดยก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทุกครั้งต้องตรวจวัด FEEM ของน้ำกลั่น Milli-Q เพื่อตรวจสอบสภาวะเครื่อง (สุภกิจ จิวเจริญ และคณะ, 2555)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

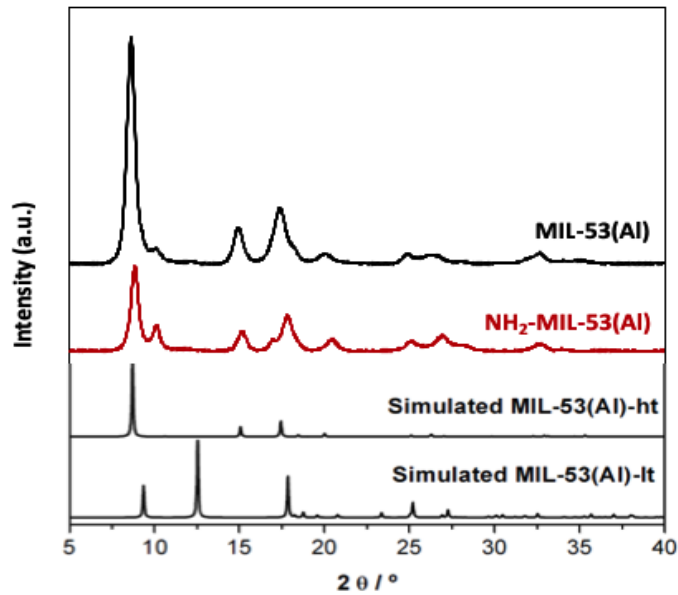
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับที่ทำการสังเคราะห์ โดยใช้การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD), ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจน (BET), การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (FTIR), การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM), และพีเอชที่ประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (PZC) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ใช้ในวิเคราะห์และอธิบายโครงสร้างของการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ และกลไกการดูดซับของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

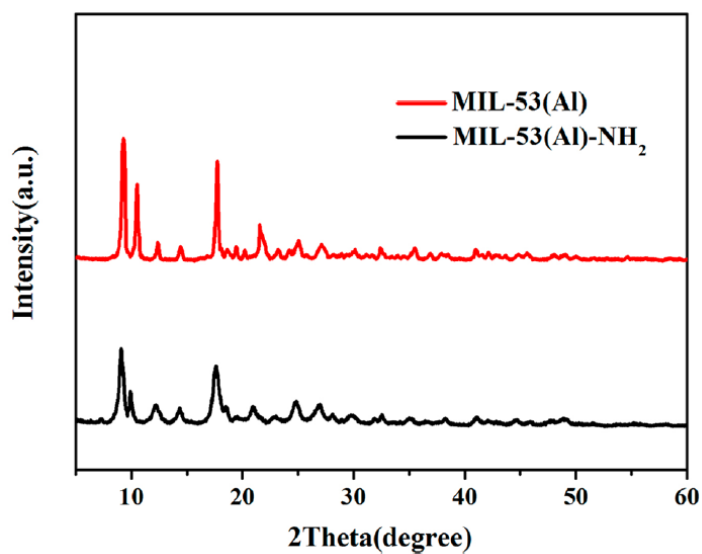
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) โดยใช้ X-Ray Powder Diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดย Cu K α radiation โดยวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนในช่วงมุม (2θ) 5 ถึง 45 องศา แสดงดังรูปที่ 4-1 พบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ MIL-53(Al) ปรากฏพีคที่ 8.62, 10.07, 14.84, 17.36, และ 20.02 องศา (2 theta) ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองรูปแบบ XRD ของ MIL-53(Al) และผลการวิเคราะห์ของ NH₂-MIL-53(Al) ปรากฏพีคมีลักษณะของพีคที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับ MIL-53(Al) โดยปรากฏพีคที่ 8.80, 10.07, 15.08, 17.7, และ 20.36 โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ MIL-53(Al) ในงานวิจัยของ Sánchez-Sánchez และคณะ (2015) และ Liu และคณะ (2018) และ NH₂-MIL-53(Al) ในงานวิจัยของ Cheng และคณะ (2013); Liu และคณะ (2013); Li และคณะ (2015) เป็นไปตามแบบจำลองของ MIL-53(Al)-ht โดยทั่วไปแล้ว MIL-53(Al) มีโครงสร้างผลึก 3 แบบคือ 1. โครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ (lp) เป็นสถานะที่ไม่มีน้ำ 2. โครงสร้างรูพรุนแคบ (np) เป็นสถานะที่มีน้ำในรูพรุน และ 3. โครงสร้างรูพรุนที่ถูกสังเคราะห์ (as) เป็นสถานะที่ตัวเชื่อมอินทรีย์ เทเรพทาเลทอิสระที่ยังคงอยู่ในรูพรุนอาจบอกได้ว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) อยู่ในรูป ht ซึ่งเป็นโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ Large pore (lp) เป็นผลมาจากการกระตุ้นตัวกลางดูดซับ

โดยการแคลซิเนชัน (Calcination) ซึ่งเป็นการกำจัดตัวเชื่อมอินทรีย์ที่หลงเหลือให้หมดไปและสถานะที่ไม่มีน้ำ ซึ่งสามารถยืนยันว่าตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นเป็น MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) ในรูปแบบ ht



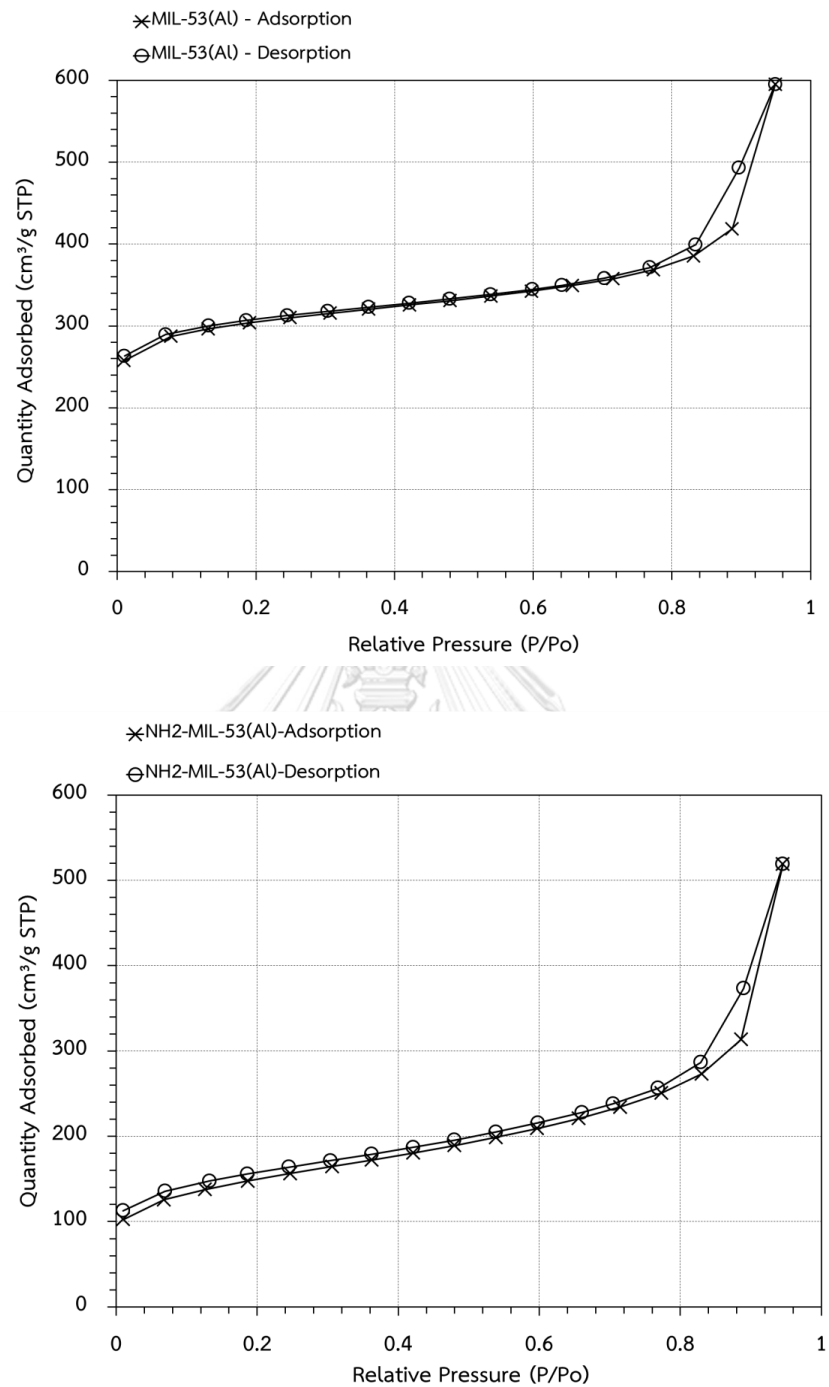
รูปที่ 4- 1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น เปรียบเทียบกับ XRD Simulation ของ MIL-53(Al)



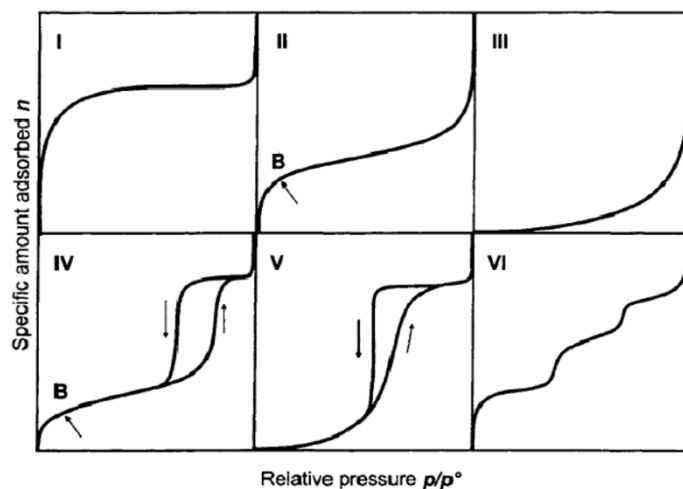
รูปที่ 4- 2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ NH₂-MIL-53(Al) ของ Li และคณะ (2015)

4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอม การดูดซับและการคายซับไนโตรเจน ซึ่งสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะคือ สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ผลการวิเคราะห์การดูดซับไนโตรเจน แสดงดัง รูปที่ 4-3 โดยพบว่าปริมาณการดูดซับก๊าซไนโตรเจนลดลงภายหลังกระบวนการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน เอมีน ซึ่งแสดงถึงพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลงโดยจากการคำนวณพบว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 923 และ 513 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา เปรียบเทียบลักษณะของกราฟไอโซเทอมตาม IUPAC ดังรูปที่ 4-4 พบว่าตัวกลางดูดซับทั้งสอง เป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ 4 โดยเกิดฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) เนื่องมาจาก ปรากฏการณ์ Capillary condensation ก๊าซไนโตรเจนภายในรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งมักพบในวัสดุที่มี โครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ซึ่งมีขนาดรูพรุน 2 ถึง 50 นาโนเมตร ซึ่งจากข้อมูล พื้นฐานของโครงสร้าง MIL-53(Al) ควรจะมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) (เล็กกว่า 2 นาโน เมตร) ซึ่งการคลาดเคลื่อนของขนาดรูพรุนของ MIL-53(Al) ที่สังเคราะห์ได้สอดคล้องกับผล การศึกษาของ Sánchez-Sánchez และคณะ (2015) ที่ทำการสังเคราะห์ MIL-53(Al) ที่อุณหภูมิห้อง เช่นเดียวกัน พบว่าลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรูพรุนขนาดกลาง โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,048 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งอาจเกิดจากสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์หลงเหลืออยู่ในช่องว่างของรูพรุน เช่น ตัวเชื่อมอินทรีย์ (BDC) ที่ยังคงเหลืออยู่ภายหลังการกระตุ้นรูพรุนโดยกระบวนการแคลซิเนชัน เนื่องจากอุณหภูมิสูงไม่เพียงพอ ทำให้ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนที่เกิดขึ้นเป็นแบบฮิสเทอรีซิสลูป แต่อย่างไรก็ตามลักษณะรูพรุนที่วัดได้มีความสม่ำเสมอสูง ในส่วนของ NH₂-MIL-53(Al) มีพื้นที่ผิว จำเพาะ 686 ตารางเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลงเนื่องมาจากการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันเอมีน ซึ่งอาจจะครอบครองพื้นที่บางส่วนไปเมื่อเปรียบเทียบกับ MIL-53(Al) ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน



รูปที่ 4- 3 ผลการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซไนโตรเจน MIL-53(Al) (บน) และ NH₂-MIL-53(Al) (ล่าง)



รูปที่ 4- 4 กราฟไอโซเทอมตาม IUPAC

(Thommes และคณะ, 2010)

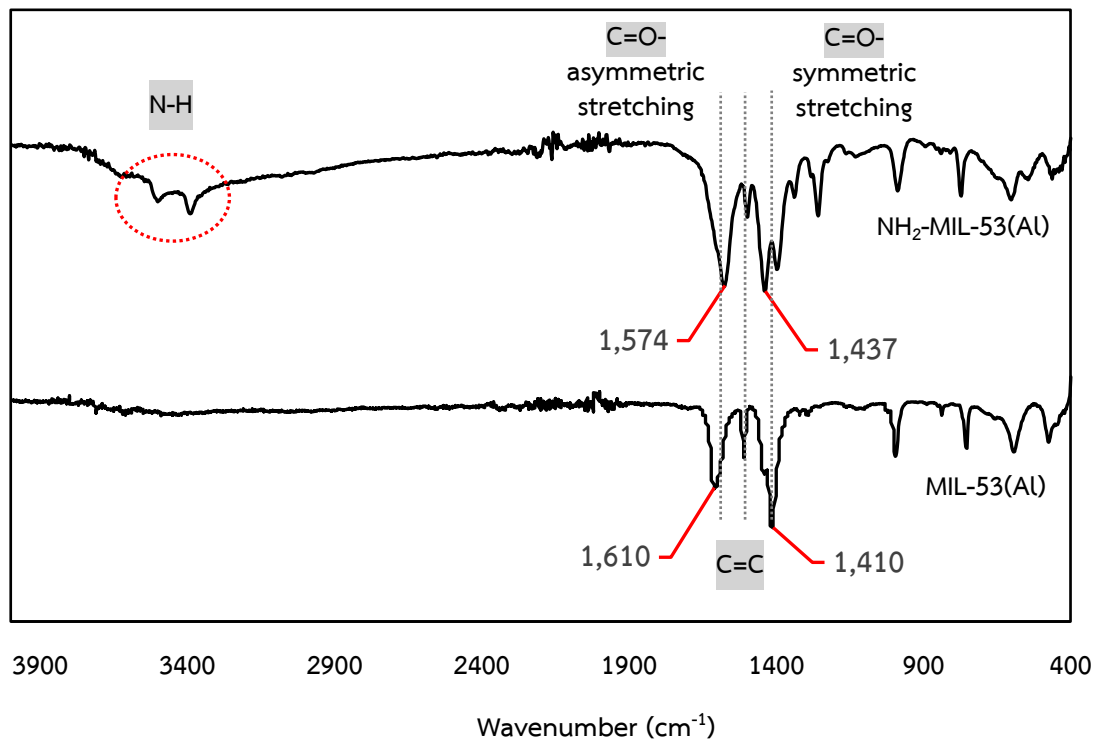
ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่คำนวณโดยใช้สมการ Barrett-Joyner-Halenda equation (BJH) โดยพบว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 4.0 และ 6.6 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ 4 โครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) จากผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของ NH₂-MIL-53(Al) มีขนาดใหญ่กว่า MIL-53(Al) อาจเป็นผลมาจากการพังทลายของโครงสร้างในกระบวนการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน จึงส่งผลต่อโครงสร้างซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลง โดยผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4- 1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al)

ตัวกลางดูดซับ	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
MIL-53(Al)	4.0	0.92	923.1
NH ₂ -MIL-53(Al)	6.6	0.85	513.0

4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) วิเคราะห์โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดทำให้หมู่ฟังก์ชันของสารแต่ละฟังก์ชันเกิดการสั่นที่มีความถี่แตกต่างกันโดยรายงานออกในรูปแบบเลขคลื่น หรือ Wave numbers โดยการวัดสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่น การยืด และการงอของพันธะภายในโมเลกุลจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะแตกต่างกันไปตามชนิดหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4- 5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) โดย FT-IR spectra

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม IR พบว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) มีลักษณะสเปกตรัมใกล้เคียงกัน แถบสเปกตรัมในช่วงความถี่ 1,700 และ 1,400 ต่อเซนติเมตร เป็นช่วงแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลต ในการศึกษา MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) พบพีคของพันธะ O=C=O แบบยืดสมมาตร ที่ 1,410 และ 1,437 ต่อเซนติเมตร และแบบยืดไม่สมมาตร ที่ 1,610 และ 1,574 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอยู่ของกลุ่มคาร์บอกซิเลตที่มาจากตัวเชื่อมอินทรีย์ (BDC) เกิดการ Coordinated กับ Al³⁺ มีการพบพีคเล็กๆที่ 1,500 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นพีคของ C=C ของวงเบนซีน ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอยู่ของวงเบนซีนจาก BDC จากผลไม่พบสเปกตรัมที่ 1,700 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมของหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) อาจบอกได้ว่าไม่มี BDC ที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาติดอยู่ในช่องว่างของตัวกลางดูดซับ (Loiseau และคณะ, 2004; Yan และคณะ, 2014; Mounfield และ Walton 2015) โดยผลการวิเคราะห์ NH₂-MIL-53(Al) มีการพบแถบสเปกตรัมเพิ่มเติมจาก MIL-53(Al) คือช่วงความถี่ 3,380 ถึง 3,500 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นพีคของ -NH แบบยืด (Stavitski และคณะ, 2553) เกิดจากการมีอยู่ของหมู่เอมีนในโครงสร้างที่ทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งสามารถยืนยันการมีอยู่ของหมู่เอมีนที่ทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันบน MIL-53(Al) ได้

4.1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ

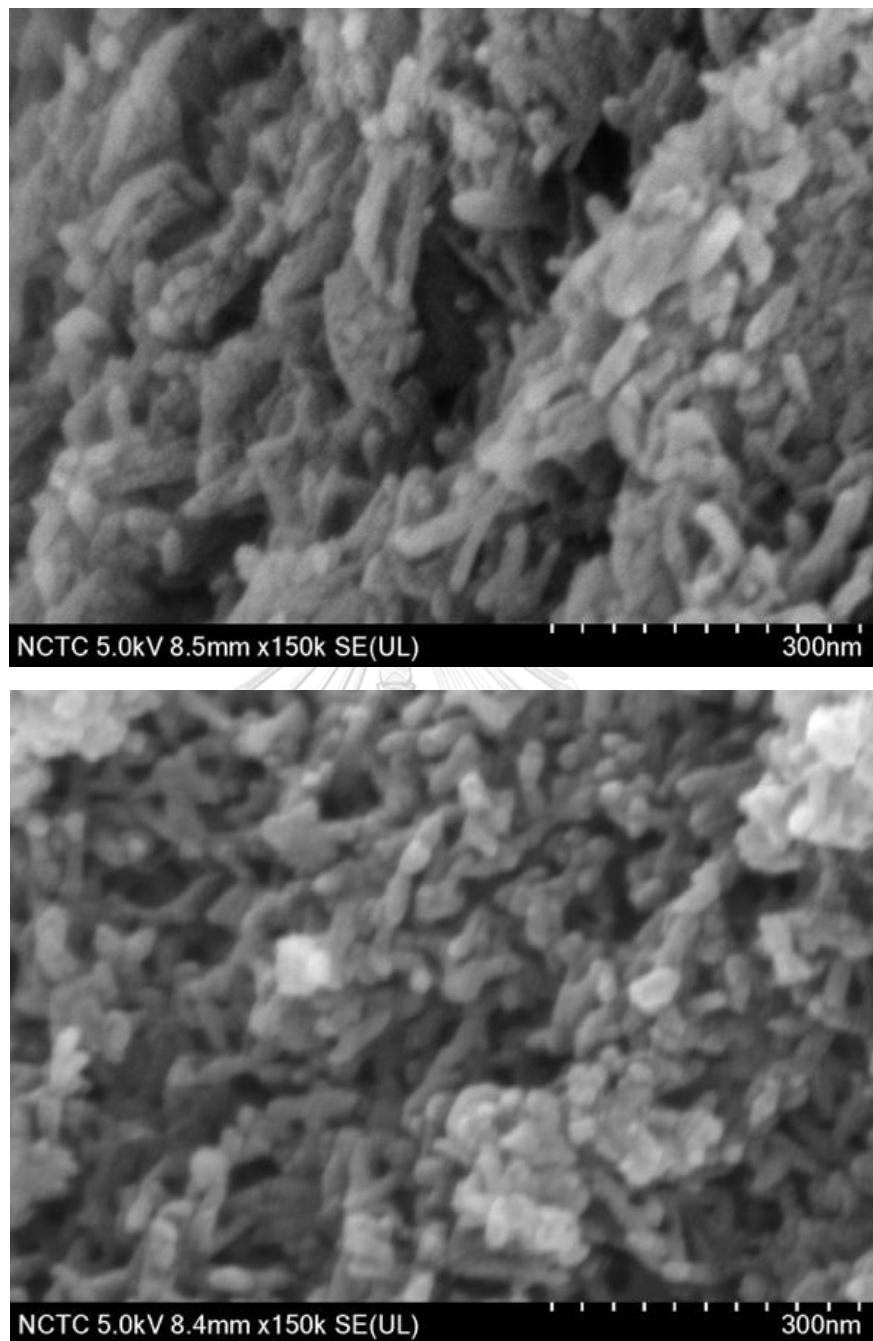
การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับที่ทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน โดยหาปริมาณธาตุไนโตรเจนบนตัวกลางดูดซับที่ทำการดัดแปรของหมู่ฟังก์ชันเอมีน สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Series II CHNS/O Analyzer 2400 เพื่อใช้ยืนยันผลการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-2 สามารถวัดปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่บนตัวกลางดูดซับ NH₂-MIL-53(Al) เท่ากับร้อยละ 4.20±0.03 โดยน้ำหนัก (% W/W) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวกลางดูดซับ MIL-53(Al) ซึ่งที่ไม่ได้ทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.41±0.04 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2013) โดยมีค่าคาร์บอนร้อยละ 42.92, ไฮโดรเจนร้อยละ 3.15, ไนโตรเจนร้อยละ 0.04 และซัลเฟอร์ร้อยละ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนทำได้เป็นผลสำเร็จ

ตารางที่ 4- 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ด้วยเครื่อง Series II CHNS/O Analyzer 2400

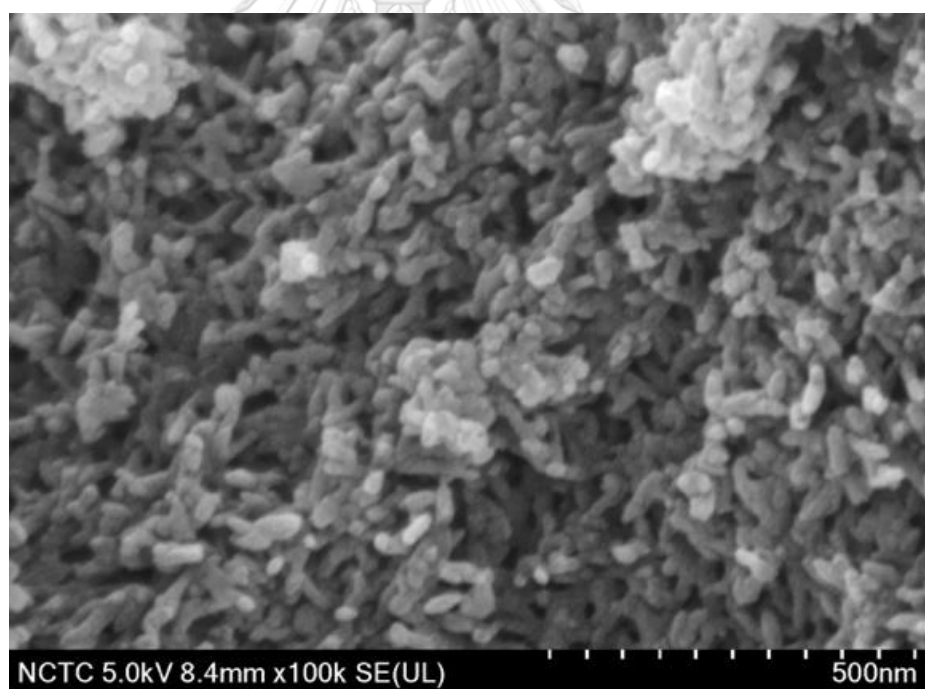
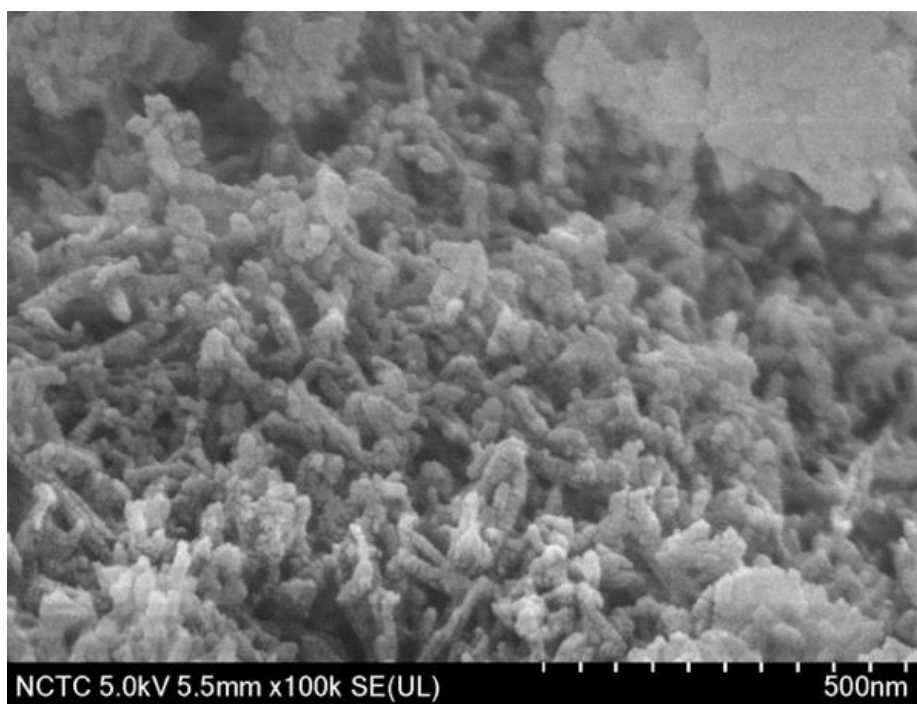
ตัวกลางดูดซับ	คาร์บอน (%)	ไฮโดรเจน (%)	ไนโตรเจน (%)	ซัลเฟอร์ (%)
MIL-53(Al)	40.86±0.52	2.98±0.27	0.41±0.04	0.65±0.08
NH ₂ -MIL-53(Al)	29.03±0.22	3.70±0.03	4.20±0.03	0.72±0.01

4.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

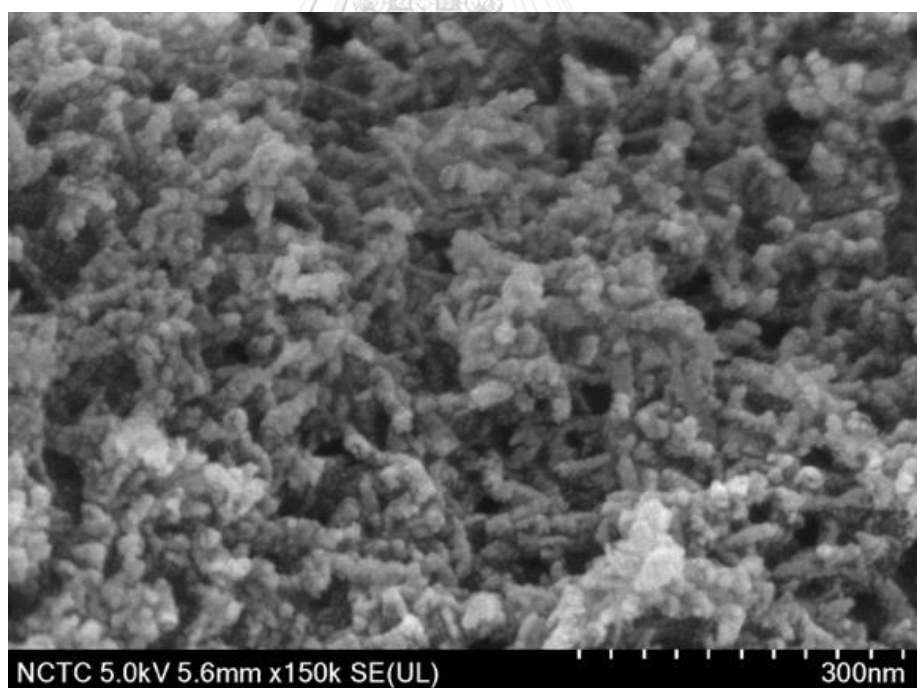
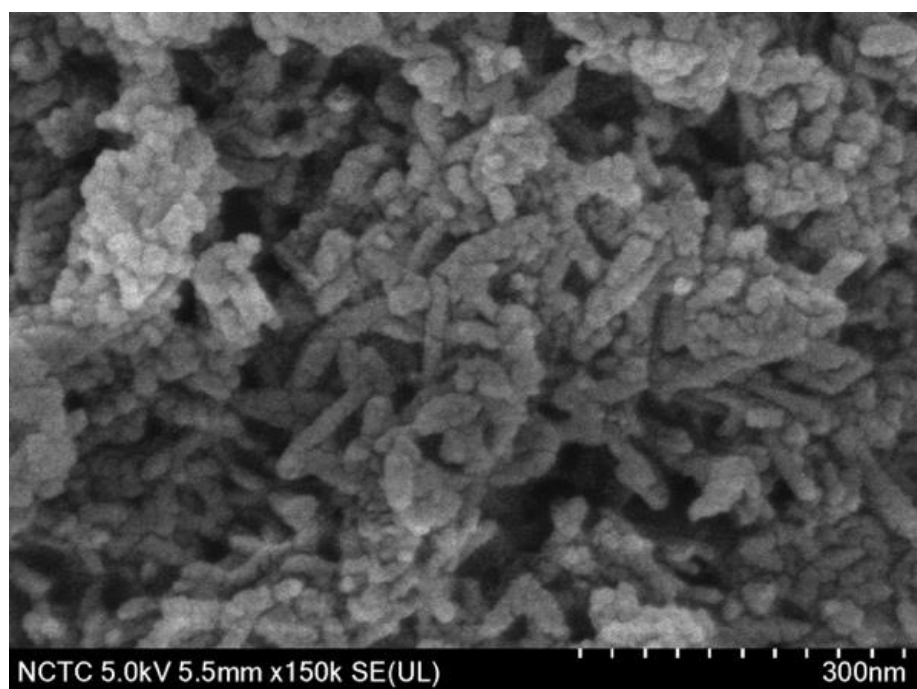
ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นทั้ง MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-6, 4-7, และ 4-8 พบว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) มีลักษณะเป็นรูปแท่ง (Rod) ที่มีขนาดแท่งยาวกว่า 300 นาโนเมตร โดยลักษณะของพื้นผิว NH₂-MIL-53(Al) มีความขรุขระและความหนามากกว่า MIL-53(Al) เนื่องจากมีการจับตัวกันของอนุภาค และการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันเอมีนจากสาร 2-Aminoterephthalic acid ที่ใช้เป็นตัวเชื่อมอินทรีย์ (Linker) ซึ่งอาจทำให้รูปทรงมีการเปลี่ยนแปลงมีความหนามากขึ้นและเสียความเป็นระเบียบของโครงสร้าง MOFs



รูปที่ 4- 6 ภาพขยายพื้นผิวของ MIL-53(Al) (บน) และ NH₂-MIL-53(Al) (ล่าง)
โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150,000 เท่า



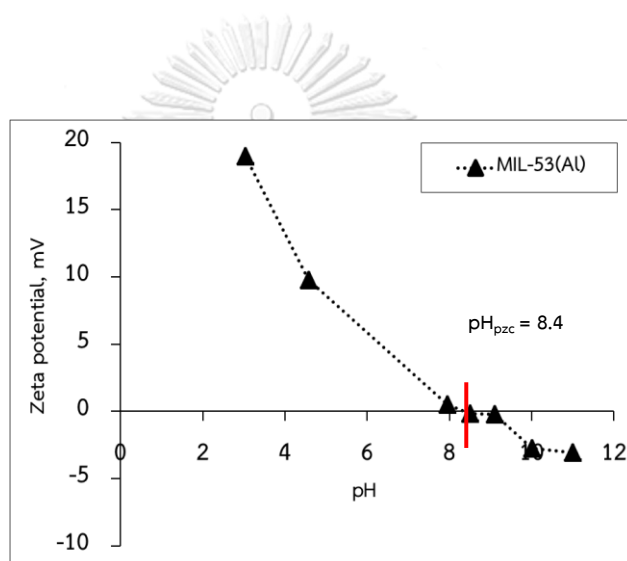
รูปที่ 4- 7 ภาพขยายพื้นผิวของ MIL-53(Al) (บน) และ NH₂-MIL-53(Al) (ล่าง)
โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 100,000 เท่า



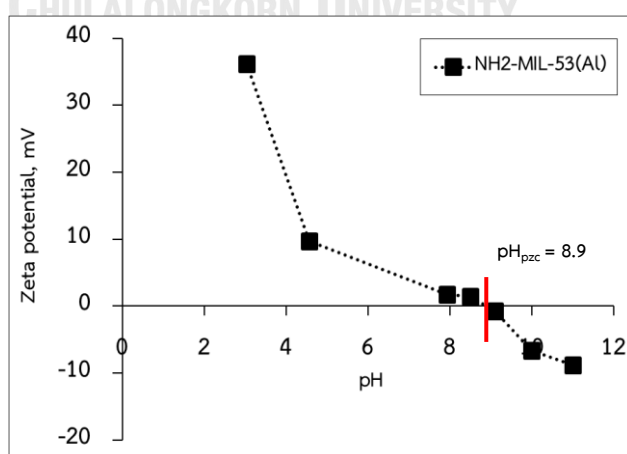
รูปที่ 4- 8 ภาพขยายพื้นผิวของ MIL-53(Al) (บน) และ NH₂-MIL-53(Al) (ล่าง)
โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150,000 เท่า

4.1.6 การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

จากการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ โดยการวัดค่า Zeta potential ที่พีเอชต่างๆ ตั้งแต่พีเอช 3 ถึง 11 ของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) แสดงดังรูปที่ 4-9 และ 4-10 ตามลำดับ พบว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) มีค่าประจุที่พื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับพีเอช 8.4 และ 8.9 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Li และคณะ (2014) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อพีเอชมีค่าน้อยกว่าค่าประจุที่พื้นผิวเป็นศูนย์ ประจุที่พื้นผิวของตัวกลางดูดซับจะมีประจุบวกและในทางตรงกันข้าม เมื่อพีเอชมีค่ามากกว่าค่าประจุที่พื้นผิวเป็นศูนย์ ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับจะแสดงประจุลบ



รูปที่ 4- 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Zeta potential และ pH ของ MIL-53(Al)



รูปที่ 4- 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Zeta potential และ pH ของ NH₂-MIL-53(Al)

4.2 การศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOM)

4.2.1 การเก็บน้ำตัวอย่าง

โดยทำการเก็บน้ำตัวอย่างจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ โดยทำการเก็บน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge: AS) จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมครอนและวิเคราะห์ความเข้มข้นของ DOM ในตัวอย่างน้ำเสียโดยใช้เครื่องวัดปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) พบว่ามีค่า TOC ประมาณ 7-10 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตรและมีค่าพีเอชประมาณ 6.95 มีความแรงไอออนที่พบในน้ำเสียประมาณ 10 มิลลิโมลาร์ โดยคำนวณจากค่าอิเล็กโทรไลต์

ตารางที่ 4- 3 ลักษณะน้ำเสียตัวอย่าง

พารามิเตอร์	TOC (mg-carbon/L)	Ionic strength (mM)	pH
น้ำเสียตัวอย่าง	7-10	~10	6-7

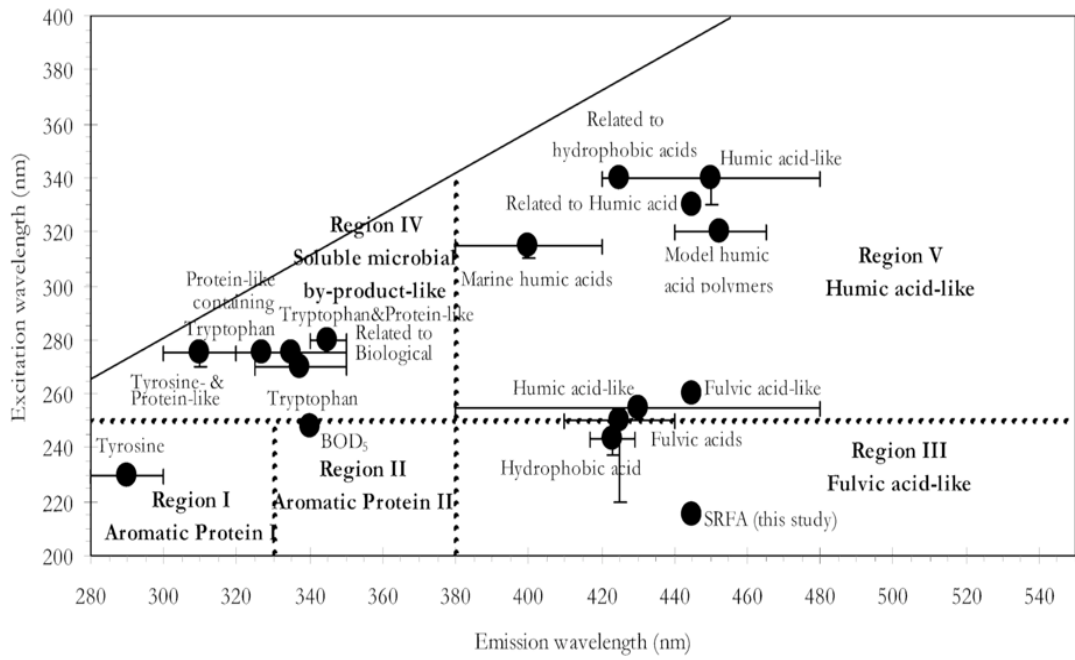
4.2.2 กระบวนการแยกประเภทสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเรซิน (กระบวนการแฟรกชันด้วยเรซิน) (Resin Fractionation)

มวลสารอินทรีย์ละลายในน้ำเสียจากจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ มีค่าเท่ากับ 14.1 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร และค่ามวลสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำ (HPI) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (HPO) มีค่าเท่ากับ 5.8 และ 4.4 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่ารวมกันเท่ากับ 11.1 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ทำให้มวลสารอินทรีย์ละลายน้ำก่อนผ่านกระบวนการแฟรกชันมีค่ามากกว่าผลรวมของมวลสารอินทรีย์ละลายน้ำหลังจากการแฟรกชัน อาจเป็นผลเนื่องมาจากขั้นตอนการชะละลาย (Elution) ในกระบวนการแฟรกชัน โดยการใช้ล้างไม่สามารถชะ HPO ออกมาจากเรซิน DAX-8 ได้ทั้งหมด

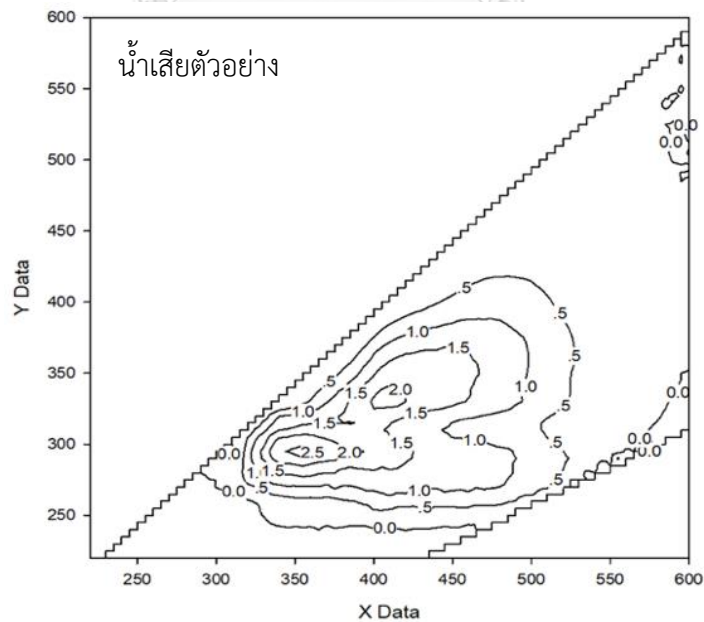
ผลการวิเคราะห์โดย Fluorescence Excitation- Emission Matrix (FEEM) แสดงผลในรูปแบบ Contour ซึ่งแกน X แสดงค่า “FEEM” มีหน่วยเป็น nm มีแกน Y แสดงค่า “Ex” มีหน่วยเป็น nm ส่วนแกน Z แสดงค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์

การตรวจวิเคราะห์ลักษณะกลุ่มสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค FEEM ในน้ำเสียจากโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ (ที่ไม่ผ่านการแปรรูปขั้นต้นเรซิน) สามารถตรวจพบความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescent peaks) 2 ตำแหน่งคือ 280nmEx/350nmEm และ 325nmEx/420nmEm ดังแสดงดังรูปที่ 4-12 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปตำแหน่ง FEEM ของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดต่างๆที่พบได้ตามธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 4-11 พบว่าบริเวณช่วงความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นกลุ่มของทริปโตเฟน (Tryptophan-like substances) โดยจัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำ (HPI) และสารกลุ่มของกรดฮิวมิก (Humic acid-like substances) คือสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (HPO) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Suksaroj และคณะ (2007) และ Musikavong และคณะ (2008) ซึ่งโดยทั่วไปความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์จากกลุ่มทริปโตเฟน และกรดฮิวมิกนี้สามารถตรวจพบได้ทั่วไปในน้ำเสียที่เกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งจากชุมชนหรือแหล่งอื่นๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์กลุ่มทริปโตเฟน และกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับในสถานะที่เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำตามลำดับ

รูปที่ 4-13 แสดง FEEM ของน้ำที่ผ่านกระบวนการแปรรูปขั้นต้นของน้ำเสียค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ FEEM ที่ตำแหน่งความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่มีค่าสูงอย่างชัดเจน ดังแสดงรูปที่ 4-13 ด้านบน พบว่าส่วนแรกที่ผ่านมาเรซินคือ HPI บริเวณช่วงความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ 280 nmEx/350nmEm และรูปที่ 4-13 ด้านล่างเกิดจากการใช้ NaOH ชะละลายเป็นน้ำส่วนที่สองคือ HPO บริเวณช่วงความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ 325nmEx/420nmEm มีความเป็นไปได้ที่ส่วนแรกเป็นกลุ่มของสารทริปโตเฟน ส่วนที่สองเป็นกลุ่มของสารฮิวมิก ซึ่งสอดคล้องกับผล FEEM ของน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปขั้นต้นที่ตรวจพบกลุ่มสารอินทรีย์ที่ความเข้มแสงบริเวณเดียวกัน



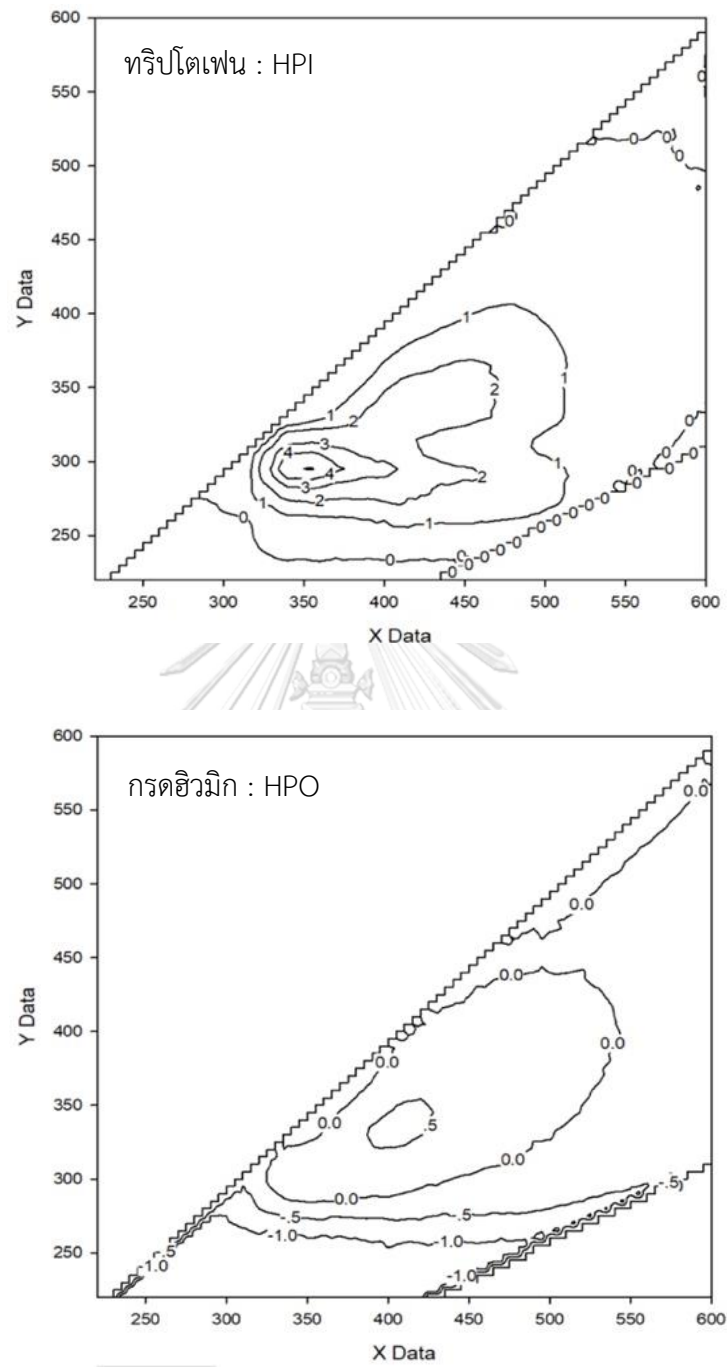
รูปที่ 4- 11 แสดงตำแหน่งและสมบัติทั่วไปของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEEM (Chen และคณะ, 2003)



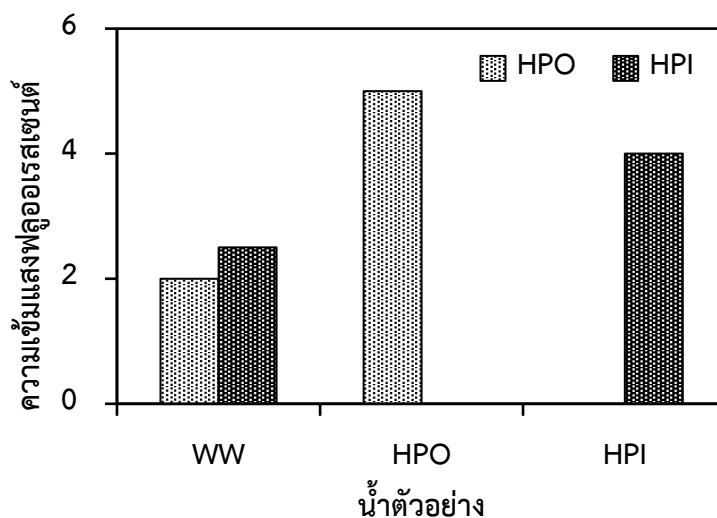
รูปที่ 4- 12 คุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ของน้ำเสียตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแปรรูป

ตารางที่ 4- 4 ตำแหน่งของ peak ของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

Excitation (นาโนเมตร)	Emission (นาโนเมตร)	กลุ่มของสารอินทรีย์ ละลายน้ำ	ชนิดของ ตัวอย่าง	อ้างอิง
275	305	Tyrosine	น้ำเสีย	Baker, 2002
275	350	Tryptophan		
320-340	410-430	Fulvic		
370-390	460-480	Humic		
237-260	400-500	Humic	น้ำเสีย น้ำในแหล่งน้ำ ธรรมชาติ	Hudson, Baker, และ Reynolds, 2007
300-370	400-500	Humic		
312	380-420	Marine humic		
225-275	340-381	Tryptophan		
225-275	310-321	Tyrosine	สารมาตรฐาน	Mostofa, Honda, และ Sakugawa, 2005
333±3	469±6	Suwannee River Fulvic acid		
330±13	484±13	Suwannee River Humic acid		
278±3	354±2	Tryptophan		
280	350	Tryptophan	น้ำเสียตัวอย่าง	การศึกษานี้
325	420	Humic		

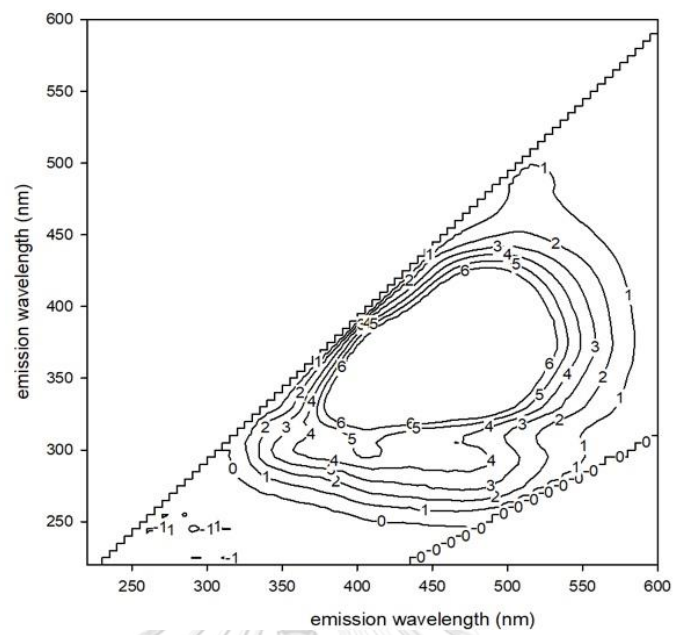


รูปที่ 4- 13 คุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแฟรกชัน



รูปที่ 4- 14 แผนภูมิแท่งแสดงความเข้มข้นฟลูออเรสเซนต์ที่ตรวจพบของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านกระบวนการแฟรกชัน

เนื่องจากน้ำที่ผ่านกระบวนการแฟรกชันมีค่าพีเอชที่สูงมากจากขั้นตอนการชะละลายที่ต้องใช้สารละลายต่างความเข้มข้นสูงจึงทำให้ไม่สามารถนำน้ำที่ผ่านกระบวนการแฟรกชันมาใช้เป็นน้ำตัวอย่างในการศึกษาขั้นต่อไปได้ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนวิธีในการแยกสารอินทรีย์ละลายน้ำ จึงเปลี่ยนมาใช้กระบวนการระเหย (Evaporation) ทำให้ได้ส่วนที่เป็นกรดฮิวมิกหรือ HPO ออกมาแสดงดังรูปที่ 4-15 ซึ่งกระบวนการนี้ไม่พบทริปโตเฟนหรือ HPI ในน้ำที่ผ่านการระเหย ซึ่งคาดว่าทริปโตเฟนนั้นเกิดการตกตะกอนออกจากน้ำจึงไม่สามารถตรวจพบได้ในน้ำตัวอย่าง จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้สารทริปโตเฟนเป็นตัวแทนของ HPI ในรูปแบบน้ำเสียสังเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 4- 15 คุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ของน้ำเสียดัวอย่างที่ผ่านมากระบวนการระเหย



4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแสดงถึงอัตราการดูดซับของยาบนตัวกลางดูดซับและขั้นตอนในการจำกัดอัตราการดูดซับสำหรับการสร้างแบบจำลองกระบวนการดูดซับ อัตราการดูดซับและเวลาที่เข้าสู่สมดุล สามารถใช้เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับผ่านการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่กระจายภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) โดยข้อมูลจะนำมาคำนวณและศึกษาความเข้ากันของแบบจำลองการดูดซับเช่น แบบจำลองอันดับที่หนึ่งเสมือนอันดับที่สองเสมือน และแบบจำลองการแพร่กระจาย Intraparticle เป็นต้น เพื่อกำหนดลำดับการดูดซับ, อัตราคงที่, และกลไกการดูดซับ

4.3.1 การทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.3.1.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับของ MIL-53(AI)

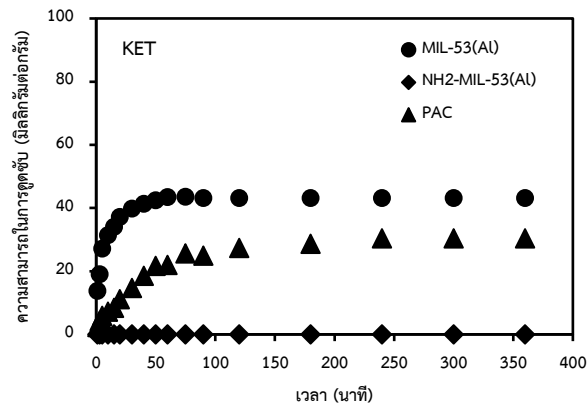
จากการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงในรูปที่ 4-16, 4-17, และ 4-18 ในการดูดซับยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ตามลำดับ โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาสูงสุด รองลงมาคือ PAC ในขณะที่ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(AI)}$ ไม่เกิดการดูดซับขึ้นเลย การดูดซับยาทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นอย่างมากในระยะเริ่มแรกและเข้าสู่สมดุลภายใน 30 และ 75 นาทีตามลำดับ ซึ่ง MIL-53(AI) มีอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่า PAC ถึง 3 เท่า และเมื่อนำข้อมูลมาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ วิเคราะห์ความเข้ากันของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่งเสมือน อันดับที่สองเสมือน และสมการของริชชี รวมถึงคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-19, 4-20, และ 4-21 จากการพิจารณาค่า R^2 พบว่ามีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเสมือน และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล q_e และค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเสมือน (k_2) ดังตารางที่ 4-5 การดูดซับที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะของ MIL-53(AI) ที่สูงและโครงสร้างรูพรุนของ MIL-53(AI) แบบยืดหยุ่นที่ทำให้ยาสามารถเข้าถึงพื้นผิวรูพรุนภายในทำให้เกิดการดูดซับยาได้ในปริมาณที่สูง

4.3.1.2 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันเอมีนบน MIL-53(Al)

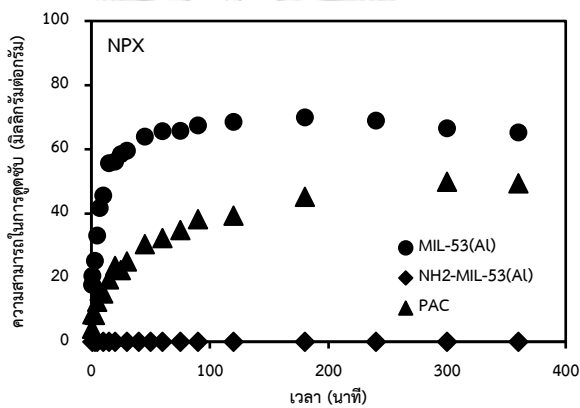
จากการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนของ MIL-53(Al) พบว่าไม่เกิดการดูดซับยาทั้งสามชนิด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวที่ลดลงของตัวกลางดูดซับ และอาจเป็นผลจากฟอสเฟตบัพเฟออร์ในสารละลายสังเคราะห์ เนื่องจากเอมีนในโครงสร้างของ NH₂-MIL-53(Al) สามารถเกิดการดูดซับระหว่าง NH₂ และออกซิเจนอะตอมของฟอสเฟต (PO₄³⁻) ส่งผลทำให้ฟอสเฟตเข้าขัดขวางการแพร่ของยาทั้งสามชนิดเข้าสู่รูพรุนภายในของ NH₂-MIL-53(Al) (Liu และคณะ, 2019) และไม่เกิดการดูดซับยาและสอดคล้องกับการศึกษาของ Li และคณะ (2014) พบว่าการมีอยู่ของ PO₄³⁻ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับยาอินทรีย์ลดลง และจากการศึกษาก่อนหน้าพบความสามารถในการดูดซับของ NH₂-MIL-53(Al) ในการดูดซับยาไดโคลฟีแนคภายใต้การควบคุมพีเอชโดย HCl และ NaOH ซึ่งไม่ได้ใช้ฟอสเฟตบัพเฟออร์ (Wang และคณะ, 2018)

4.3.1.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับของ PAC

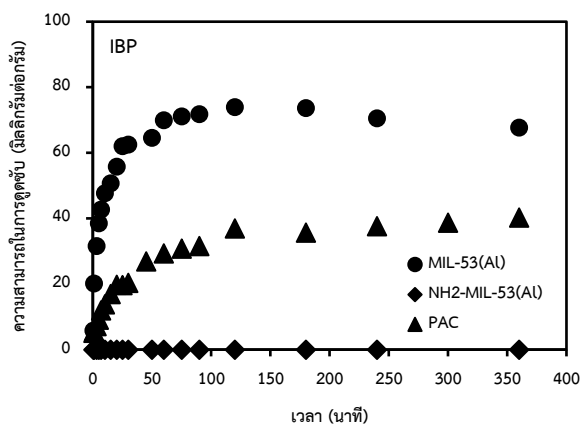
รูปที่ 4-16, 4-17, และ 4-18 แสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับของ PAC แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับค่อยๆเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มแรกภายใน 90 นาที และใช้เวลาเข้าสู่สมดุลมากกว่า MIL-53(Al) ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลมาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์ อันดับที่หนึ่งเหมือน อันดับที่สองเหมือน และสมการของรีชีรวมถึงคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-19, 4-20, และ 4-21 พบว่ามีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเหมือนเช่นเดียวกับกรณีของ MIL-53(Al) โดยพิจารณาจากค่า R² และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล q_e และค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเหมือน (k₂) ดังตารางที่ 4-5 การดูดซับอาจเกิดจากลักษณะรูพรุน การเข้าถึงของยาและหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายของ PAC ดังนั้นการดูดซับของยาทั้งสามชนิดบน PAC จึงสามารถเข้าถึงสมดุลช้ากว่า MIL-53(Al)



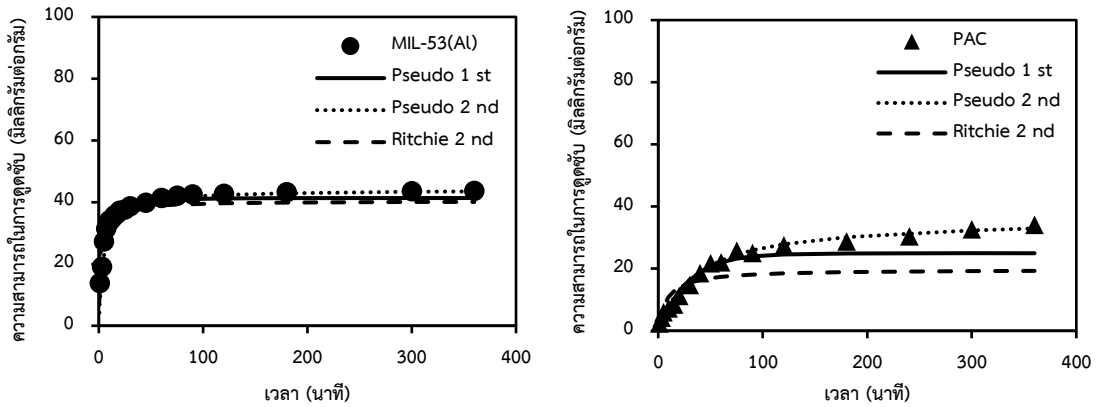
รูปที่ 4- 16 จลนพลศาสตร์การดูดซับคีโตโพรเฟนบน MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



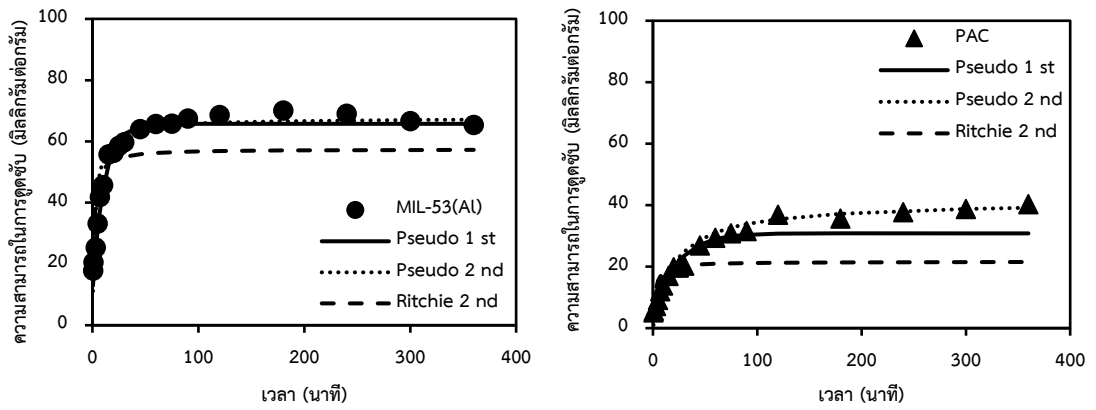
รูปที่ 4- 17 จลนพลศาสตร์การดูดซับนาพรอกเซนบน MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



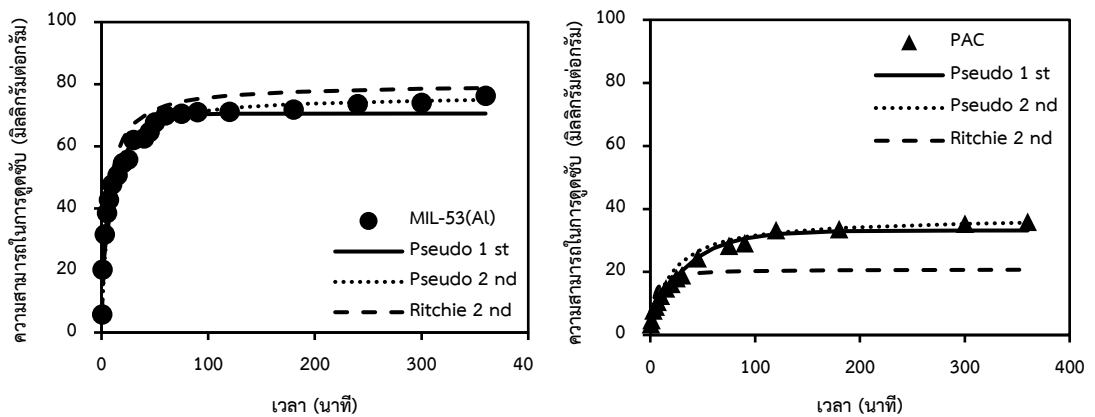
รูปที่ 4- 18 จลนพลศาสตร์การดูดซับไอบูโพรเฟนบน MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4- 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับยาคีโตโปรเฟน โดย MIL-53(A) และ PAC



รูปที่ 4- 20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับยานาพรอกเซน โดย MIL-53(A) และ PAC



รูปที่ 4- 21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับยาไอบูโพรเฟน โดย MIL-53(A) และ PAC

ตารางที่ 4- 5 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

จลนพลศาสตร์	พารามิเตอร์	คีโตโพรเฟน		นาพรอกเซน		ไอบูโพรเฟน	
		MIL-53(AI)	PAC	MIL-53(AI)	PAC	MIL-53(AI)	PAC
Pseudo-first-order	q_e (mg/g)	39.99	23.97	65.55	30.34	70.32	30.59
	k_1 (min^{-1})	0.019	0.0156	0.0406	0.0172	0.0264	0.0116
	R^2	0.8783	0.9708	0.9428	0.9775	0.9208	0.9890
Pseudo-second-order	q_e (mg/g)	40.82	25.87	64.83	33.86	71.06	31.08
	k_2 (g/mg.min)	0.0048	0.0008	0.0058	0.0012	0.0020	0.0014
	h	9.27	1.00	26.67	2.08	11.42	2.03
	$t^{1/2}$ (min)	4.75	36.04	2.53	19.83	6.69	18.45
	R^2	0.9999	0.9921	0.9987	0.9951	0.9994	0.9960
Ritchie-second-order	q_e (mg/g)	38.97	18.87	56.23	21.18	73.10	20.23
	k_r (L/min)	0.4788	0.1225	0.7532	0.5005	0.1766	0.3458
	R^2	0.9427	0.9342	0.8269	0.7496	0.9362	0.9155

พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่คำนวณได้สามารถบ่งบอกถึงอัตราการดูดซับของตัวกลางดูดซับ ค่าคงที่อัตราการดูดซับของสมการอันดับที่สองเสมือน (k_2) เมื่อพิจารณาถึงพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของสมการอันดับที่สองเสมือนโดยเปรียบเทียบกับอัตราเร็วการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (h) ของ MIL-53(AI) มีอัตราการดูดซับในช่วงเริ่มต้นของยาทั้งสามชนิดสูงกว่า PAC ในทางตรงกันข้ามครึ่งเวลาของการดูดซับ ($t^{1/2}$) ของ MIL-53(AI) มีค่าน้อยกว่า PAC ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราการดูดซับที่รวดเร็วของ MIL-53(AI) และมีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และตัวกลางดูดซับที่ลดลงทำให้ขนาดของหน่วยปฏิบัติการดูดซับมีขนาดเล็กกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์แบบทั่วไป

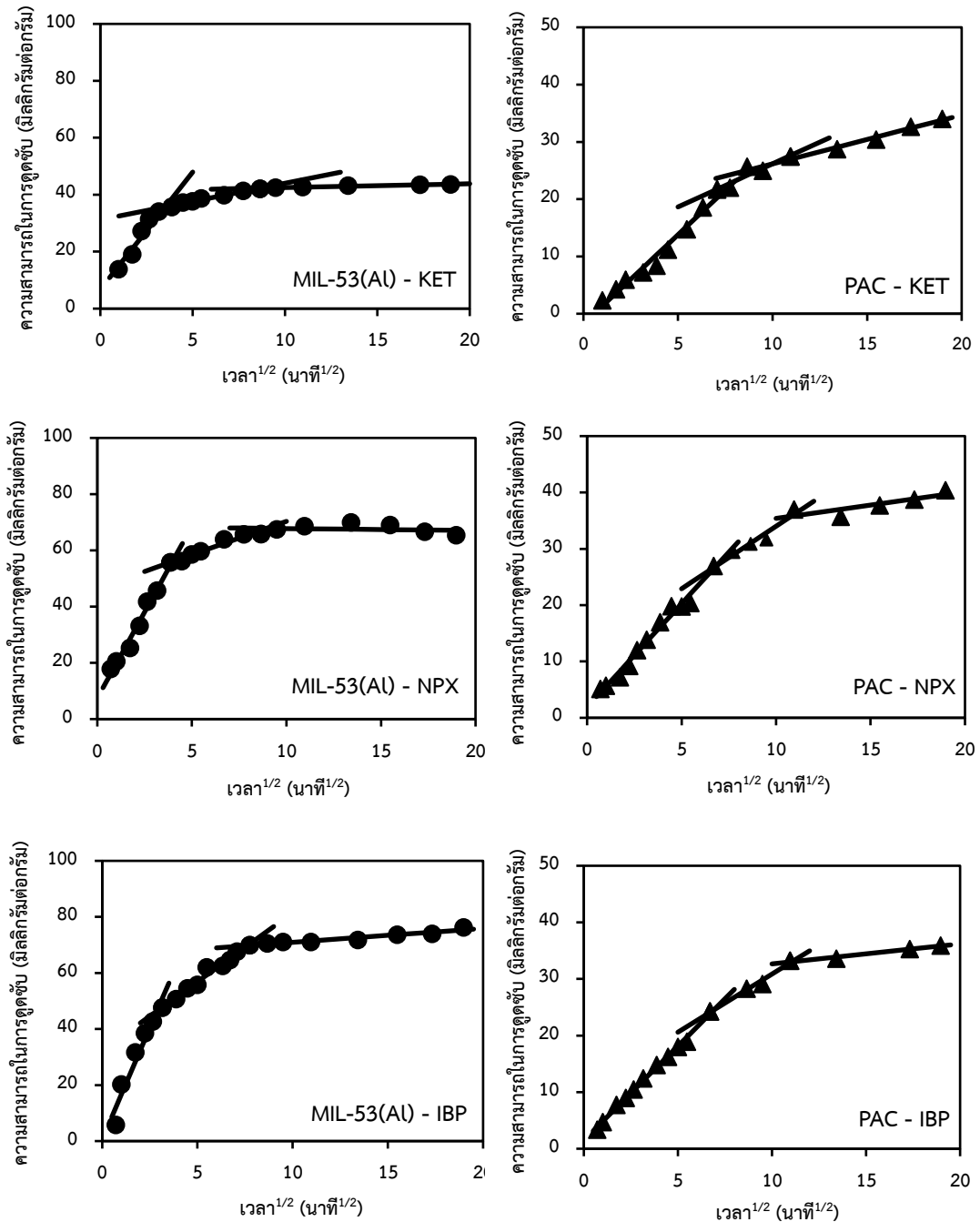
4.3.2 กลไกการแพร่ภายในอนุภาค

4.3.2.1 การแพร่ภายในรูพรุนของ MIL-53(AI) และ PAC

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์มาสร้างกราฟตามสมการการแพร่ภายในรูพรุนไปยังพื้นผิวภายในตัวกลางดูดซับ สามารถแบ่งลำดับการดูดซับออกเป็นสามขั้นตอนดังรูปที่ 4-22 โดยปกติทั่วไปกลไกการดูดซับของการดูดซับระหว่างของเหลวและของแข็งมีสามขั้นตอน (จุดิมา, 2554) ค่า k_1 แรกเป็นการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังบริเวณผิวภายนอกตัวกลางดูดซับ หรือ Boundary layer/Film diffusion ค่า k_1 ที่สองเป็นกลไกการแพร่ภายในอนุภาคหรือการแพร่ภายในรูพรุน ในขณะที่ค่า k_1 ที่สามเป็นขั้นสมดุลการดูดซับคือมวลสารถูกดูดซับภายในตัวกลางดูดซับ ขั้นตอนที่จำกัดอัตราการเร็วการดูดซับ (Rate limiting step) อาจเป็นอัตราการเร็วการแพร่ภายนอก และหรืออัตราการแพร่กระจายภายในรูพรุน สำหรับ MIL-53(AI) ในการดูดซับยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน พบกลไกการดูดซับเกิดขึ้นทั้งสามขั้นตอน จากตารางที่ 4-5 ค่าคงที่อัตราการเร็วการแพร่ภายนอก (k_{11}) ของ MIL-53(AI) มีค่ามากกว่า PAC ทั้ง 3 ยา ซึ่งอาจเป็นเพราะขนาดอนุภาคของ MIL-53(AI) มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของ PAC ทำให้อัตราการการแพร่ภายนอกของ MIL-53(AI) เกิดขึ้นได้เร็วกว่า PAC

สำหรับอัตราการดูดซับขั้นตอนที่สองที่แสดงโดยค่าคงที่อัตราการแพร่กระจายภายในรูพรุน (k_{12}) ขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนนี้ เนื่องจากค่าคงที่อัตราการแพร่กระจายภายในรูพรุน (k_{12}) มีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการเร็วการแพร่ภายนอก (k_{11}) ทั้งในกรณี MIL-53(AI) และ PAC นั้นหมายถึงขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการเร็วการดูดซับโดยค่าคงที่อัตราการแพร่กระจายภายในรูพรุน (k_{12}) ของ MIL-53(AI) มากกว่า PAC ดังแสดงในตารางที่ 4-6 ซึ่งสอดคล้องกับค่า k_{12} ของยาทั้งสามชนิดโดยเรียงตามลำดับดังนี้ ไอบูโพรเฟน > นาพรอกเซน > คีโตโพรเฟน ค่า k_{12} ที่สูงแสดงให้เห็นว่ายาสสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ง่าย สำหรับตัวกลางดูดซับชนิด MIL-53(AI) เนื่องจากไอบูโพรเฟน มีขนาดเล็กมาก (12.4 Å) เปรียบเทียบกับขนาดของ นาพรอกเซนและคีโตโพรเฟนซึ่งมีขนาด 13.2 และ 13.5 Å ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-23 (Lin, Zhao, และ Yu, 2018) ทำให้ไอบูโพรเฟนสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของ MIL-53(AI) ได้ง่ายกว่ายาอีกสองชนิด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ PAC ขนาดรูพรุนของ MIL-53(AI) มีขนาดใหญ่กว่าและเป็นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ (Uniform) และสามารถยืดหยุ่น

ได้ (Flexible framework) ทำให้การเข้าถึงพื้นที่ผิวภายในเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า PAC ที่มีขนาดรูพรุนที่หลากหลายและขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีขนาดเล็ก

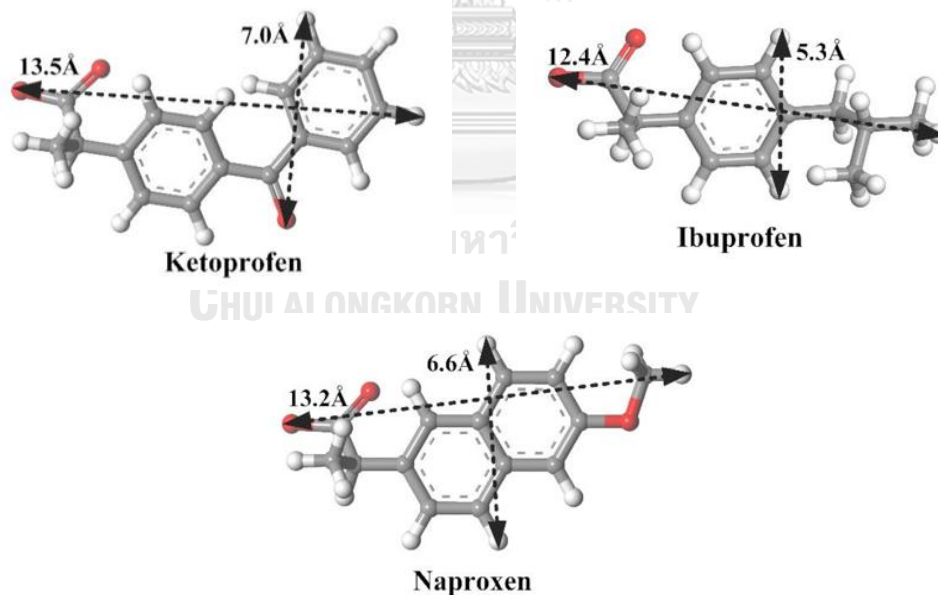


รูปที่ 4- 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับและเวลา $^{1/2}$ ของการดูดซับ

คีโตโพรเฟร นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนโดย MIL-53(Al) และ PAC

ตารางที่ 4- 6 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ

กลไกการดูดซับ	พารามิเตอร์	คีโตโพรเฟน		นาพรอกเซน		ไอบูโพรเฟน	
		MIL-53(Al)	PAC	MIL-53(Al)	PAC	MIL-53(Al)	PAC
External diffusion step	k_{i1} (mg/g.min ^{1/2})	8.24	3.11	12.22	3.66	15.92	3.33
	C	6.74	-1.77	7.48	1.93	0.65	1.49
	R ²	0.9706	0.9682	0.9681	0.9746	0.9364	0.9958
Internal diffusion step	k_{i2} (mg/g.min ^{1/2})	1.28	1.51	2.38	2.22	4.92	2.05
	C	31.23	11.10	46.53	11.79	32.23	10.32
	R ²	0.9810	0.8686	0.9813	0.9540	0.9639	0.9827



รูปที่ 4- 23 ขนาดโมเลกุลยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน
(ที่มา: Lin และคณะ, 2018)

4.4 ไอโซเทอมการดูดซับ

4.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับยาที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับยาแบบเดี่ยวบนตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันโดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับและทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณยาที่เหลืออยู่ในสารละลายและนำไปคำนวณความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล

4.4.1.1 ผลกระทบของการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนบน MIL-53(AI)

ผลของความสามารถในการดูดซับโดย MIL-53(AI) และ NH₂-MIL-53(AI) แสดงดังรูปที่ 4-24 MIL-53(AI) ที่ไม่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพบว่ามีความสามารถสูงสุดในการดูดซับยา ยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และโอบูโพรเฟน เท่ากับ 56.3, 55.2, และ 87.6 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมดุล 7.2, 2.8, และ 4.9 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ การดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ การดูดซับที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากของ MIL-53(AI) คือ 923 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่า NH₂-MIL-53(AI) อีกทั้งอาจเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตเนื่องจากเมื่อในสภาวะในการทดลองมีการควบคุมพีเอชประมาณ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ทำให้พีเอชน้อยกว่า pH_{pzc} ของ MIL-53(AI) ($pH_{pzc} = 8.4$) จึงทำให้ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ มีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกและที่พีเอชดังกล่าวยาทั้งสามชนิดนั้นมีประจุเป็นลบเนื่องจากมีค่า pK_a ประมาณ 4 จึงทำให้ยามีประจุบนพื้นผิวเป็นลบ และในส่วนของโลหะอลูมิเนียมของ MIL-53(AI) ที่เป็นประจวบกับประจุลบของยา ในกรณีดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้น อีกทั้งการดูดซับอาจเกิดจากพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดขึ้นระหว่าง MIL-53(AI) และยา รวมถึงการเกิดพันธะ $\pi-\pi$ จากโครงสร้างเบนซีนของทั้งยาและตัวกลางดูดซับ (Khan, Hasan, และ Jhung, 2013; Kumar และคณะ, 2018)

ภายหลังการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนทำให้ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ ไม่เกิดการดูดซับขึ้นอาจเกิดจากแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและประจุลบของฟอสเฟต เนื่องจากการทดลองนี้เกิดขึ้นภายใต้ควบคุมพีเอชประมาณ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ในสภาวะที่พีเอช 2.13 ถึง 7.20 ฟอสเฟตจะอยู่ในรูป $\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ และ pH_{pzc} ของ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ มีค่าประมาณ 9 ทำให้เกิดการดูดซับฟอสเฟตขึ้นที่พีเอชต่ำกว่า pH_{pzc} ทำให้ NH_2 ที่อยู่บนพื้นผิวจะได้รับ H^+ และอยู่ในรูปของประจุบวกคือ $-\text{NH}_3^+$ เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการดึงดูดระหว่าง H_2PO_4^- และ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ ซึ่งแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นนี้อาจมากกว่าแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างยาและ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ (Lin, Chen, และ Jochems, 2015; Gu และคณะ, 2017)

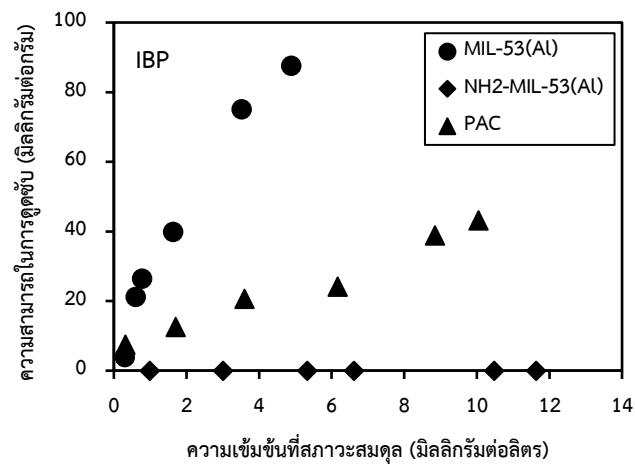
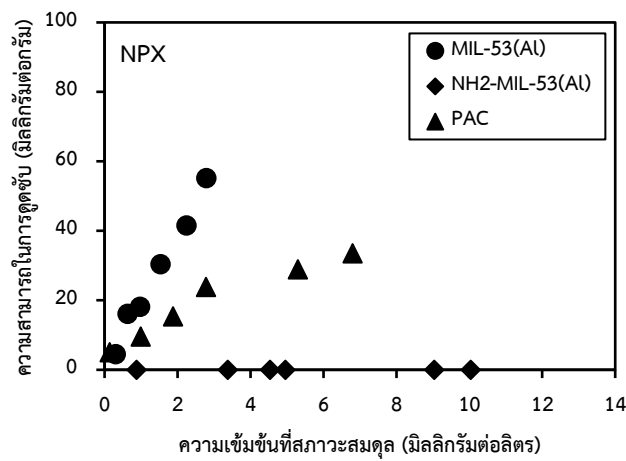
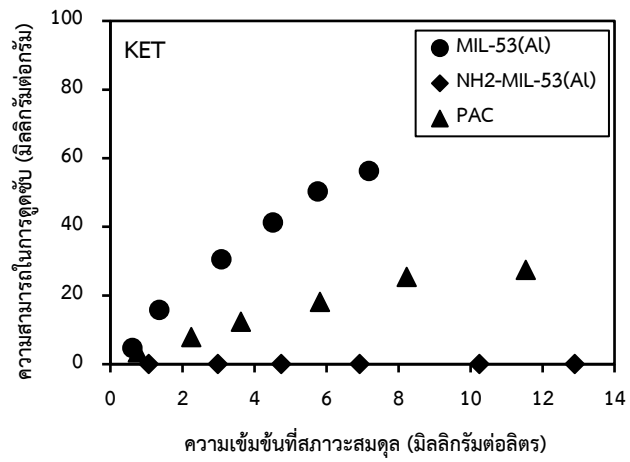
อย่างไรก็ตามฟอสเฟตในน้ำสังเคราะห์มีโอกาสที่จะเกิดการรบกวนการดูดซับได้ทั้งในกรณี MIL-53(Al) ที่ไม่ได้ดัดแปรหมู่เอมีนโดยสามารถตรวจพบปริมาณฟอสเฟตที่สูงบนตัวกลางดูดซับที่ผ่านกระบวนการทดลองการดูดซับแล้วทั้งกรณีที่ได้ดัดแปรและไม่ดัดแปรหมู่เอมีน โดยกรณีที่ไม่มีการดัดแปรหมู่เอมีนพบว่าฟอสเฟตส่งผลกระทบต่อ การดูดซับผ่านโครงสร้างโลหะอะลูมิเนียม แต่ในกรณีของ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ อาจได้รับผลกระทบมากกว่าจากการขัดขวางการดูดซับทั้ง 2 กรณีได้แก่ หมู่เอมีนและโครงสร้างโลหะอะลูมิเนียม

4.4.1.2 ไอโซเทอมการดูดซับของ PAC

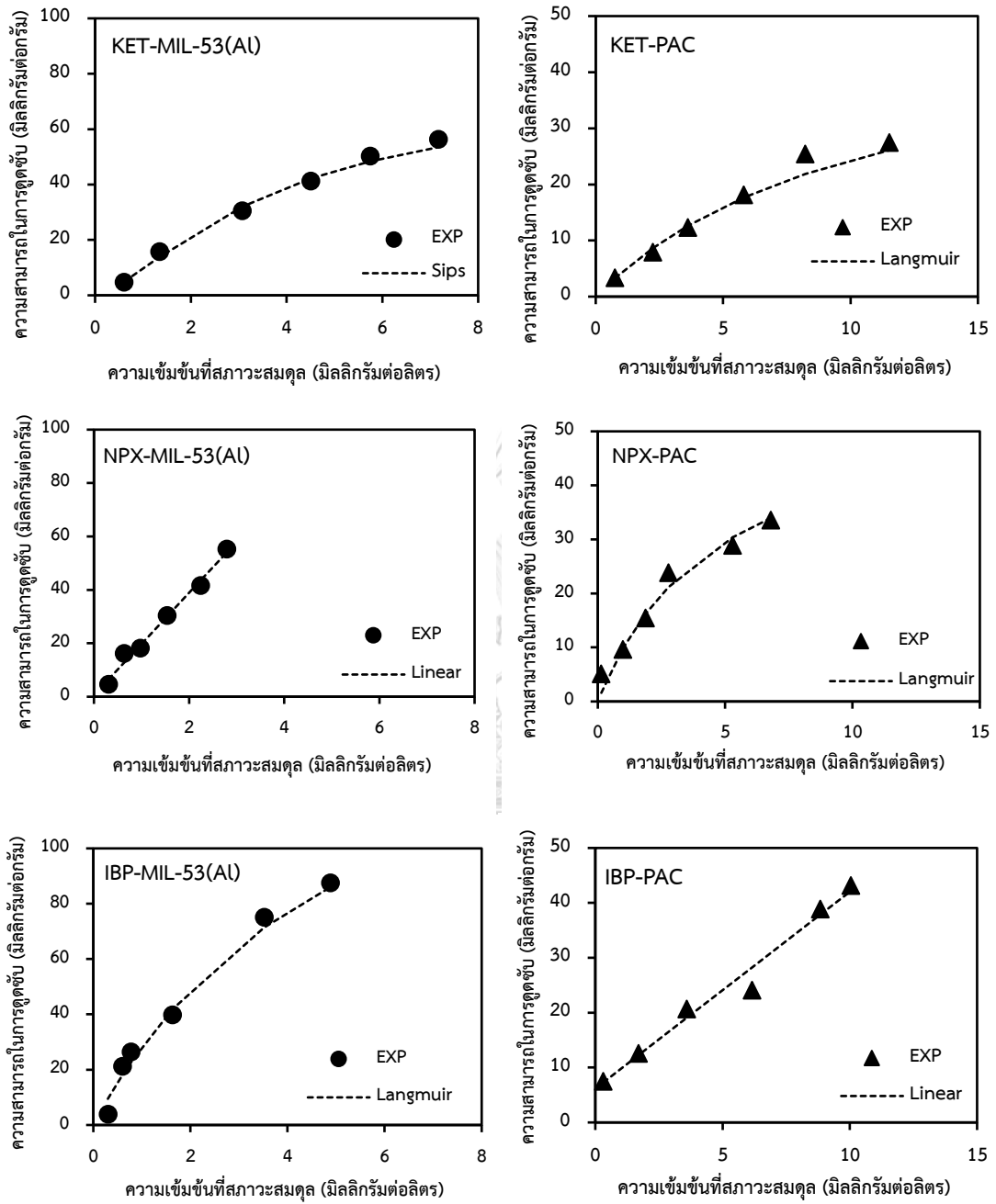
เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างตัวกลางดูดซับที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น MIL-53(Al) พบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่า MIL-53(Al) มีความสามารถในการดูดซับในการดูดซับยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนสูงสุดเท่ากับ 27.4, 33.6, และ 43.2 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมดุล 11.5, 6.8, และ 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในจลนพลศาสตร์การดูดซับ PAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (1,123 ตารางเมตรต่อกรัม) และมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่หลากหลายรวมทั้งการดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุบวกของ PAC และประจุลบของยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ MIL-53(Al) สัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่หลักในการดูดซับโดยตรง ได้แก่ Al-OH_2 (เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างโลหะอะลูมิเนียม) และวงเบนซีนจาก BDC ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมอินทรีย์ (Organic linker) ของ MIL-53(Al) กับสัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ก่อให้เกิดการดูดซับของ PAC เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) และหมู่ฟีนอลิก เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่า MIL-53(Al)

มีสัดส่วนหมู่ฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดการดูดซับสูงกว่าทำให้ MIL-53(AI) สามารถดูดซับยาทั้งสามชนิดได้ดีกว่า PAC นอกจากนี้จากข้อมูลของไอโซเทอมการดูดซับยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนของ PAC พบว่าผลการดูดซับเหมาะสมที่สุดกับไอโซเทอมแลงเมียร์ แลงเมียร์ และเส้นตรง ตามลำดับ





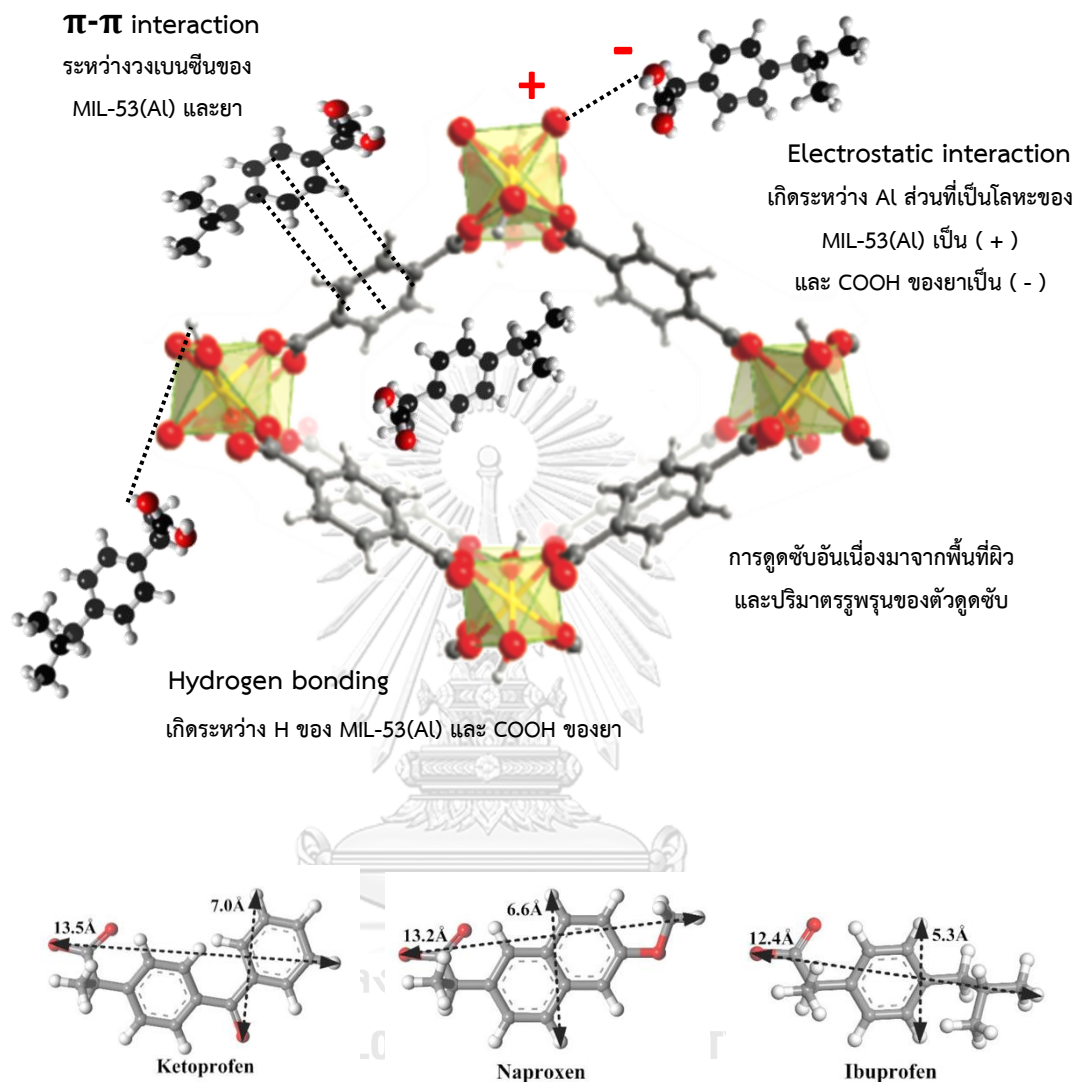
รูปที่ 4- 24 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับของยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน (ตามลำดับ) โดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC



รูปที่ 4- 25 กราฟแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับยาคีโตนโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟน (ตามลำดับ) โดย MIL-53(Al) และ PAC (ซ้ายและขวาตามลำดับ)

ตารางที่ 4- 7 ตารางแสดงค่าคงที่ต่างๆของไอโซเทอมการดูดซับยาคลีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนโดย MIL-53(AI) และ PAC

ไอโซเทอม	พารามิเตอร์	คลีโตโปรเฟน		นาพรอกเซน		ไอบูโพรเฟน	
		MIL-53(AI)	PAC	MIL-53(AI)	PAC	MIL-53(AI)	PAC
แลงก์เมียร์	q_m (mg/g)	278.3	50.76	557.5	58.37	182.27	64.47
	K_L (L/mg)	0.04	0.09	0.03	0.20	0.18	0.15
	R^2	0.9918	0.9855	0.9864	0.9785	0.9882	0.9061
ฟรุนด์ลิช	K_F (mg/L)(L/mg) ^{1/n}	9.29	4.24	17.86	12.00	16.46	11.07
	1/n	0.98	0.81	1.10	0.51	1.11	0.53
	R^2	0.9866	0.9761	0.9861	0.9706	0.9534	0.9344
เส้นตรง	K_p (L/mg)	7.79	2.34	19.10	4.20	17.29	3.58
	C	3.95	3.19	0.67	6.89	8.61	6.16
	R^2	0.9782	0.9534	0.9871	0.9368	0.9635	0.9782
ชิปส์	q_m (mg/g)	73.6620	59.80	140.96	109.08	85.47	144.82
	K_S (L/mg) ^{1/n}	0.15	0.09	0.16	0.12	0.73	0.08
	1/n	1.46	0.88	1.27	0.56	2.22	1.69
	R^2	0.9925	0.9843	0.9822	0.9655	0.9295	0.9155
เรดลิช และ ปีเตอร์สัน	K_{RP} (L/g)	9.29	3.97	25.08	141.01	33.95	23.81
	b_j (L/mg) ^{1/β}	0.007	0.004	0.50	11.15	0.14	1.01
	β	0.002	2.18	0.47	0.55	1.31	0.71
	R^2	0.9782	0.9769	0.9842	0.9668	0.9862	0.8943



รูปที่ 4- 26 กลไกการดูดซับที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนกับ MIL-53(Al)

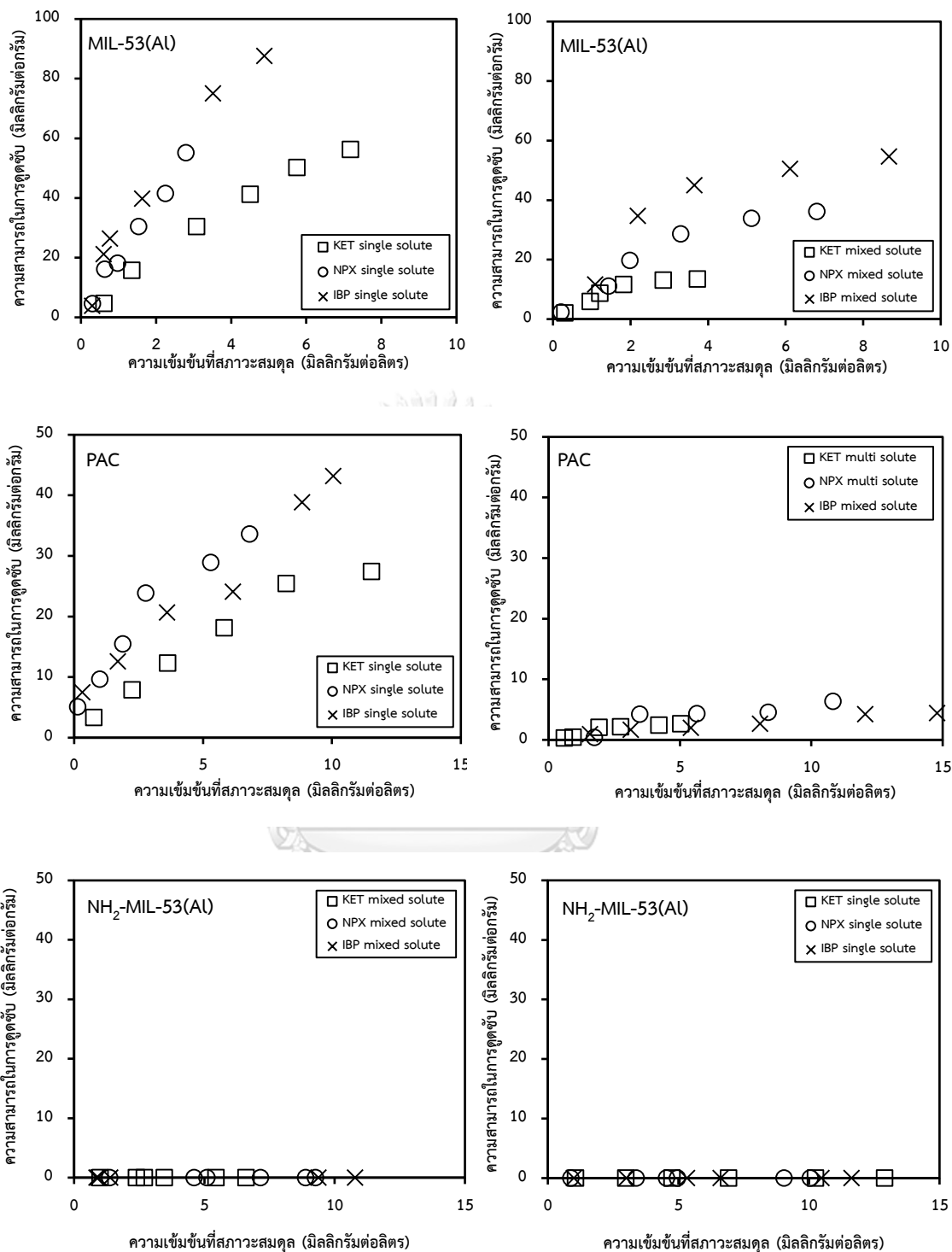
4.4.2 การดูดซับแบบคัดเลือก

4.4.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมที่ความเข้มข้นสูง

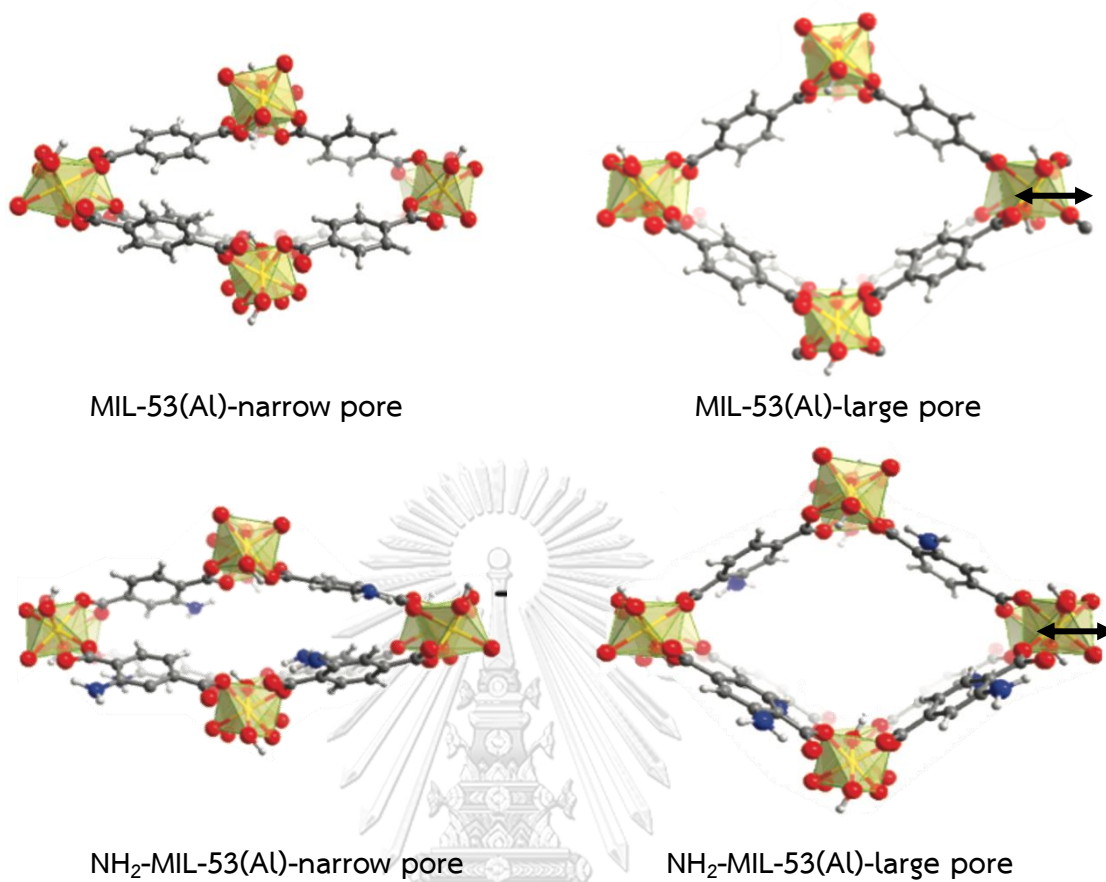
การดูดซับแบบคัดเลือกในเสียสังเคราะห์แบบผสมที่มียาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนอยู่ร่วมกัน เพื่อศึกษาการดูดซับแบบเลือกของ MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC ดังแสดงในรูปที่ 4-27 พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดสำหรับไอบูโพรเฟน มากกว่านาพรอกเซน และซีโตโปรเฟน ตามลำดับ คือที่ 13.5, 36.2, และ 54.6 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมดุล 3.7, 6.8, และ 8.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ การดูดซับที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่า MIL-53(AI) ในการดูดซับยาในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม มีความสามารถในการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว อาจเกิดจากปรากฏการณ์ Breathing effect ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของ MOF ที่สามารถเพิ่มปริมาตรรูพรุนได้เมื่อเจอกับสิ่งเร้าที่เข้ามา เช่น สารอินทรีย์กลุ่มไนโตรเบนซีน เป็นต้น (Millange และคณะ, 2551)

สำหรับตัวกลางดูดซับ NH₂-MIL-53(AI) ไม่เกิดการดูดซับทั้งชิ้นเช่นเดียวกับกรณีการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยว

ในกรณีของ PAC มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดสำหรับไอบูโพรเฟนมากกว่านาพรอกเซน และซีโตโปรเฟนตามลำดับ คือที่ 2.6, 6.4, และ 4.4 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมดุล 5.0, 10.8, และ 14.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับ MIL-53(AI) แต่ความสามารถในการดูดซับนั้นต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสมนั้นต่ำกว่าน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยวเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องแบ่งพื้นที่ในการดูดซับเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของยามากขึ้น ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถอธิบายถึงการแข่งขันระหว่าง ยาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนบนตัวกลางดูดซับและแบ่งพื้นที่ผิวในการดูดซับ ประการแรกความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนที่สูงที่สุดใน MIL-53(AI) และ PAC ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์แบบเดี่ยวและแบบผสมอาจเกี่ยวข้องกับขนาดโมเลกุลของยาไอบูโพรเฟน ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่านาพรอกเซน และซีโตโปรเฟน ตามลำดับ ซึ่งทำให้ยาไอบูโพรเฟนสามารถเข้าถึงไปยังพื้นผิวของตัวกลางดูดซับได้มากกว่าซึ่งสอดคล้องกับขนาดของยาและขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับ



รูปที่ 4- 27 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสม โดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC (ตามลำดับ)



รูปที่ 4- 28 ปรัชการณื Breathing effect ของ MIL-53(Al) (บน) และ NH₂-MIL-53(Al) (ล่าง)
(ที่มา: Stavitski และคณะ, 2010)

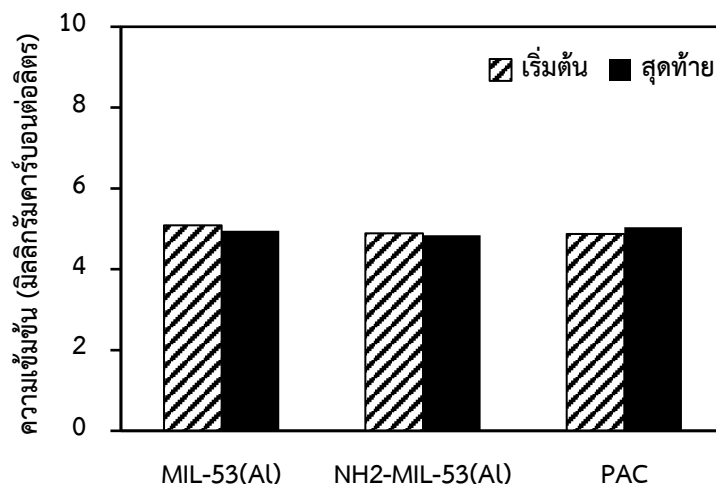
4.4.3 การดูดซับสารตกค้างจากยาร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

4.4.3.1 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำต่อการดูดซับ

เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำต่อการดูดซับยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำเสียจริงที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (WWTP) ของโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ เป็นตัวอย่างน้ำในการศึกษาครั้งนี้ น้ำเสียก่อนผ่านกระบวนการแฟรกชันมีค่า TOC เท่ากับ 7-10 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร (มก.-คาร์บอน/ล.) นอกจากนี้ตัวอย่างน้ำเสียจะถูกแยกสารอินทรีย์ละลายน้ำธรรมชาติ (DOM) ออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ สารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic DOM (HPI)) และสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic DOM (HPO)) โดยการแยกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด DAX-8 การศึกษา TOC พบว่าความเข้มข้นของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำทั้งของ HPO และ HPI เท่ากับ 7.3 และ 3.9 มก.-คาร์บอน/ล. ตามลำดับ การศึกษาผลกระทบของ DOM ต่อการดูดซับยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนความเข้มข้นสูง โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC ดำเนินการทดลองในช่วงความเข้มข้นยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนเริ่มต้นระหว่าง 1-12 มก./ล. พีเอชในการทดลองให้เป็นไปตามน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดมา (ตามลักษณะน้ำเสีย) อัตราส่วนของตัวกลางดูดซับต่อตัวกลางดูดซับคงที่ที่ 100 มก./ล. ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 °C

4.4.3.1.1 การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (DOM) ของตัวกลางดูดซับ

การศึกษากการดูดซับของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่าทั้ง MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC ไม่เกิดการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (รูปที่ 4-29) อาจเป็นผลมาจากขนาดของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของ MIL-53(AI) และ PAC จึงไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนและไม่เกิดการดูดซับขึ้น



รูปที่ 4- 29 ความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารอินทรีย์ละลายน้ำจากการเปรียบเทียบการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำของตัวกลางดูดซับต่างๆ

4.4.3.1.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (DOM) ต่อการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยว

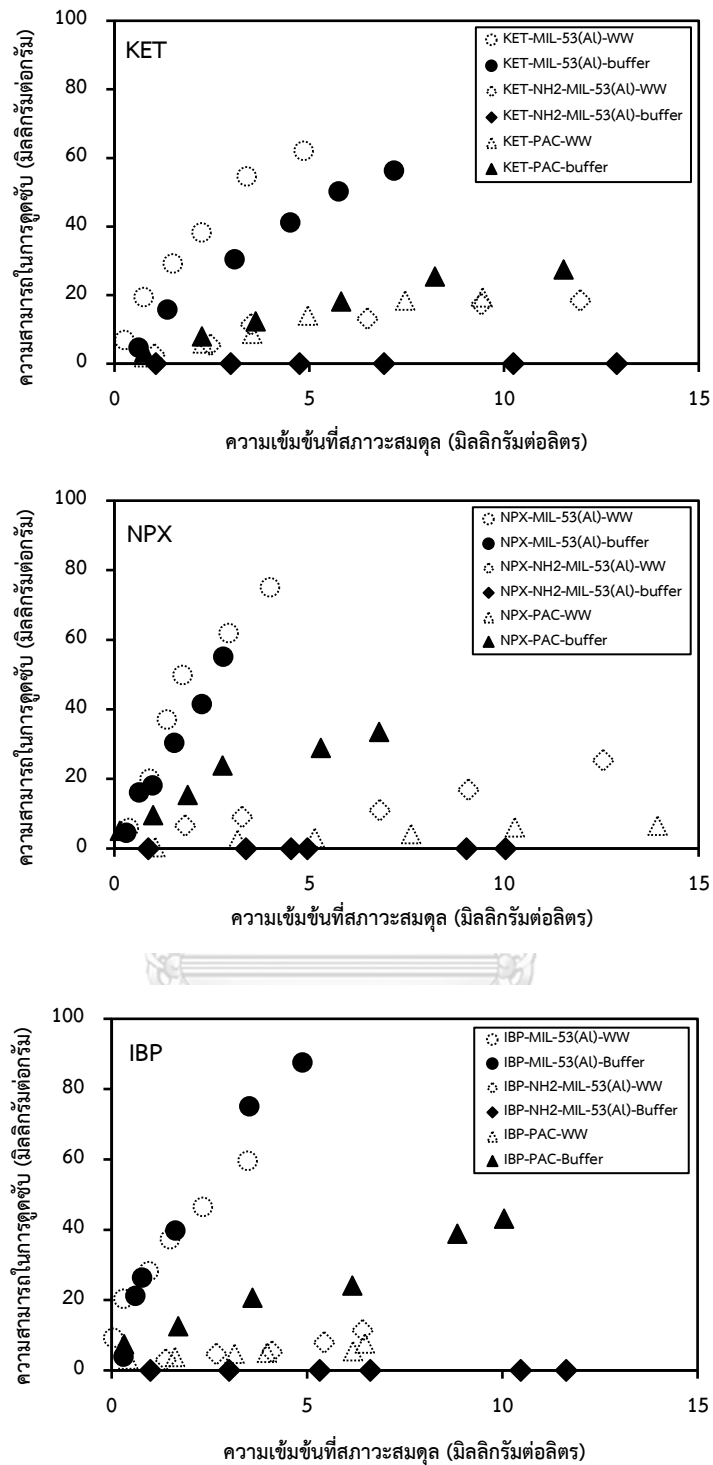
จากการศึกษาการดูดซับของยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ร่วมกับ DOM โดยตัวกลางตัวดูดซับ MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาสูงที่สุด รองลงมาคือ NH₂-MIL-53(AI) และสุดท้ายคือ PAC แสดงดังรูปที่ 4-30

ความสามารถในการดูดซับยา คีโตโพรเฟน ที่อยู่ร่วมกับ DOM โดย MIL-53(AI) สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับ คีโตโพรเฟน ที่ไม่ร่วมกับ DOM คือจาก 41.2 เป็น 62 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมมูล 4.5 และ 4.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของ DOM ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ คีโตโพรเฟน ของ MIL-53(AI) โดยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเนื่องมาจากขยายตัวของรูพรุนของปรากฏการณ์ Breathing effect และผลกระทบของฟอสเฟตที่มีน้อยลงเนื่องจากในน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียมีปริมาณฟอสเฟตอยู่น้อยมาก ทำให้คีโตโพรเฟนสามารถถูกดูดซับได้ง่ายขึ้น ส่วนการดูดซับของ PAC ไม่พบการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการดูดซับจากการมีอยู่ของ DOM นอกจากนี้ NH₂-MIL-53(AI) มีการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มี DOM เช่นเดียวกับกรณี MIL-53(AI) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการขยายตัวของรูพรุนและผลกระทบที่ลดลงของฟอสเฟต

ความสามารถในการดูดซับยานาพรอกเซนที่อยู่ร่วมกับ DOM โดย MIL-53(AI) สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย 55.2 เป็น 62 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมมูล 2.8 และ 2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับยานาพรอกเซนที่ไม่ร่วมกับ DOM แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของ DOM และฟอสเฟตส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับยานาพรอกเซนเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ถึงแม้ว่า MIL-53(AI) จะสามารถขยายขนาดรูพรุนได้ในกรณีที่มีสารอินทรีย์อยู่ร่วมได้ แต่อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของยานาพรอกเซนอาจจะสามารถทำปฏิกิริยากับ DOM (Maoz และ Chefetz, 2553) ได้ทำให้เกิดการแข่งขันการดูดซับยานาพรอกเซนระหว่าง MIL-53(AI) และ DOM

แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับยานาพรอกเซนของ NH₂-MIL-53(AI) มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการลดผลกระทบจากการแย่งพื้นที่การดูดซับของฟอสเฟตต่อหมู่เอมีนบนโครงสร้างของ NH₂-MIL-53(AI) นอกจากนี้พบว่า PAC สามารถดูดซับยานาพรอกเซนได้ลดลงอย่างมากซึ่งอาจเป็นผลมาจากยานาพรอกเซนทำปฏิกิริยากับ DOM ที่มีอยู่ในน้ำเสียทำให้เหลือนาพรอกเซนอิสระน้อยลง แต่ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี MIL-53(AI) และ NH₂-MIL-53(AI) อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับของ MIL-53(AI) และ NH₂-MIL-53(AI) ต่อนาพรอกเซนสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยานาพรอกเซนกับ DOM ที่มีอยู่ในน้ำเสีย

ความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนเมื่ออยู่ร่วมกับ DOM โดย MIL-53(AI) พบว่าความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนลดลงเพียงเล็กน้อยเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับยาที่ไม่ร่วมกับ DOM ซึ่งผลจากการขยายตัวของรูพรุนและการลดผลกระทบของฟอสเฟตไม่ส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับของไอบูโพรเฟน เช่นเดียวกับกรณีของยานาพรอกเซน PAC มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อไอบูโพรเฟนอยู่ร่วมกันกับ DOM เนื่องจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไอบูโพรเฟนกับ DOM และ NH₂-MIL-53(AI) มีประสิทธิภาพการดูดซับไอบูโพรเฟนสูงขึ้นซึ่งอาจเป็นผลมาจากผลกระทบของฟอสเฟตที่ลดลง



รูปที่ 4- 30 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของยาเคโติโพรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนระหว่างร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำและในสารละลายบัฟเฟอร์ (ตามลำดับ)

โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC

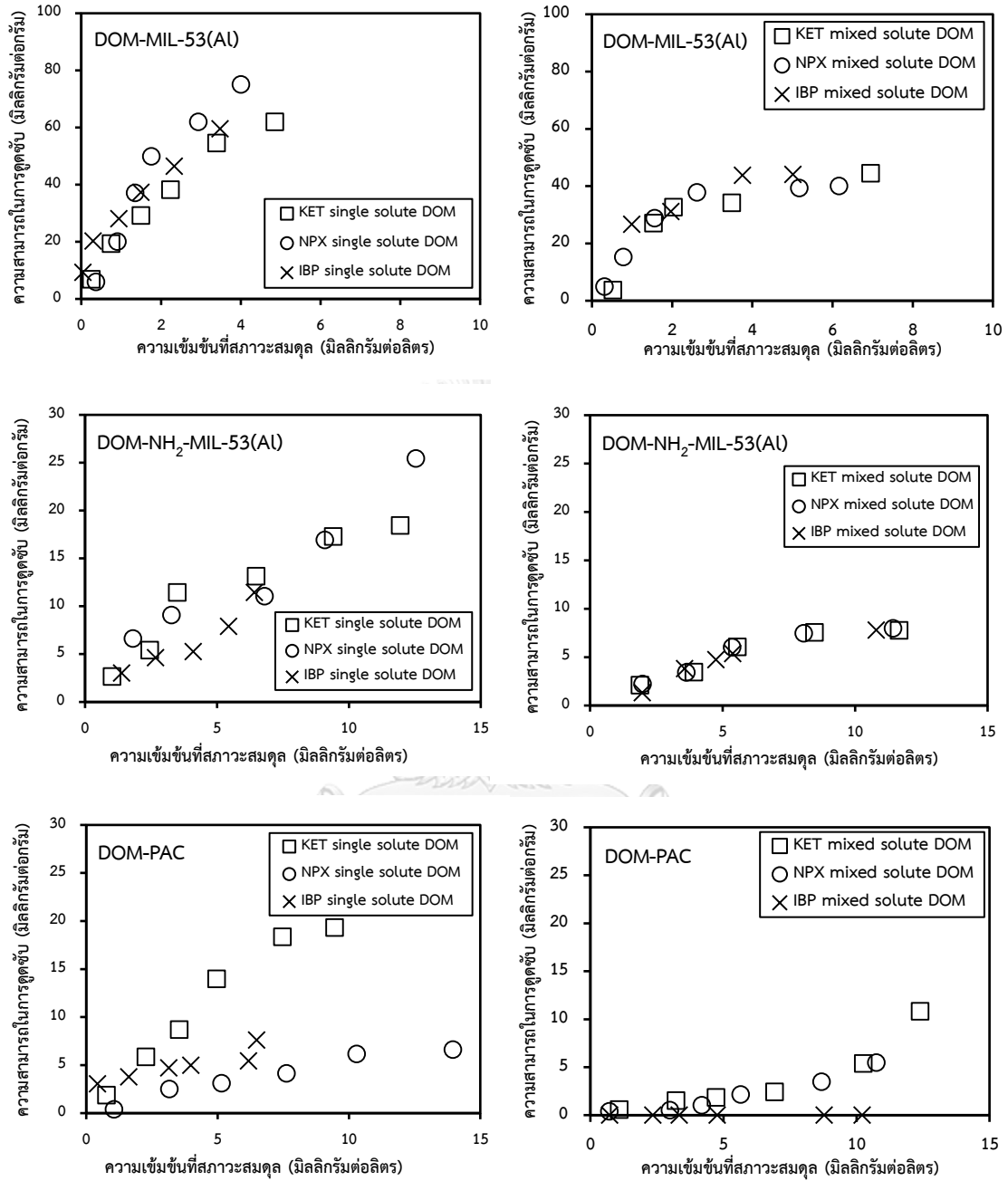
4.4.3.1.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย (DOM) ต่อการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบผสมสารผสม

จากการศึกษาการดูดซับของยาแบบผสมคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับ DOM โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาสูงที่สุด รองลงมาคือ NH₂-MIL-53(AI) และสุดท้ายคือ PAC แสดงดังรูปที่ 4-31

การดูดซับโดย MIL-53(AI) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยาแบบเดี่ยวและแบบผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำพบว่าความสามารถในการดูดซับยาแบบผสมมีความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องมาจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับของยาแต่ละชนิด โดยความสามารถในการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับยาทั้งสามประเภทในกรณีแบบผสมพบว่า การขยายขนาดรูพรุน (Breathing effect) ส่งผลให้การดูดซับสารตกค้างจากยาสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเช่นเดียวกับในกรณีการดูดซับแบบผสมที่ไม่มี DOM อยู่ในน้ำ

สำหรับการดูดซับโดย NH₂-MIL-53(AI) พบว่าความสามารถในการดูดซับยาแบบผสมร่วมกับ DOM ลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ DOM อาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับจึงต้องแบ่งพื้นที่ในการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับยาทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ปรากฏการณ์ขยายรูพรุนสามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน แต่จากโครงสร้างรูพรุนของ NH₂-MIL-53(AI) ที่มีพื้นผิวและปริมาตรรูพรุนต่ำกว่า MIL-53(AI) และการมีอยู่ของหมู่เอมีน อาจก่อให้เกิดการขัดขวางการเข้าถึงรูพรุนภายในมากกว่ากรณีของ MIL-53(AI) ทำให้พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับยาทั้งสามชนิดในเวลาเดียวกันของ NH₂-MIL-53(AI) สูงขึ้นกว่าแบบเดี่ยวไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี MIL-53(AI)

การดูดซับโดย PAC พบว่าความสามารถในการดูดซับคีโตโพรเฟนร่วมกับ DOM แบบผสมมีความสามารถในการดูดซับลดลงเป็นอย่างมาก ความสามารถในการดูดซับนาพรอกเซนร่วมกับ DOM แบบผสมลดลงเพียงเล็กน้อย และความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนร่วมกับ DOM แบบผสมไม่เกิดการดูดซับขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ DOM อาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับระหว่างยาแต่ละชนิด และการแย่งชิงพื้นที่การดูดซับกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเป็นอย่างมากสำหรับยาทุกชนิดเมื่ออยู่ร่วมกับ DOM

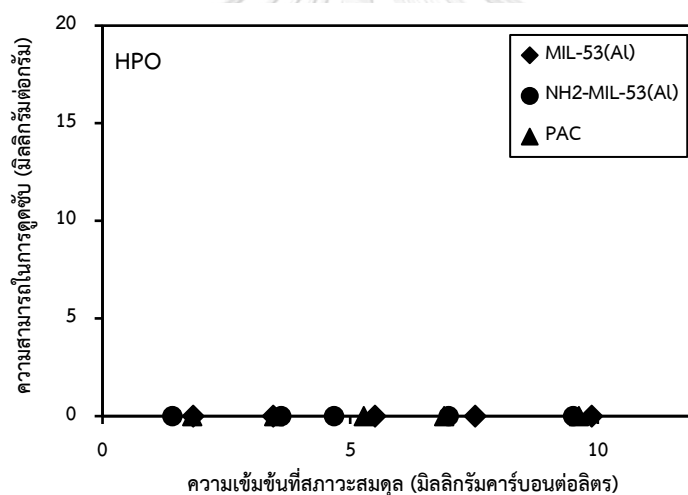


รูปที่ 4- 31 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสม ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC (ตามลำดับ)

4.4.3.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการดูดซับสารตกค้างจากยา

4.4.3.2.1 การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO)

จากการศึกษาการดูดซับของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำโดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC พบว่าทั้ง MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC ไม่เกิดการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ อาจเป็นผลมาจากขนาดของสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งส่วนมากเป็นกรดฮิวมิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของ MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC จึงไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนและไม่เกิดการดูดซับขึ้น



รูปที่ 4- 32 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ โดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC

4.4.3.2.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยว

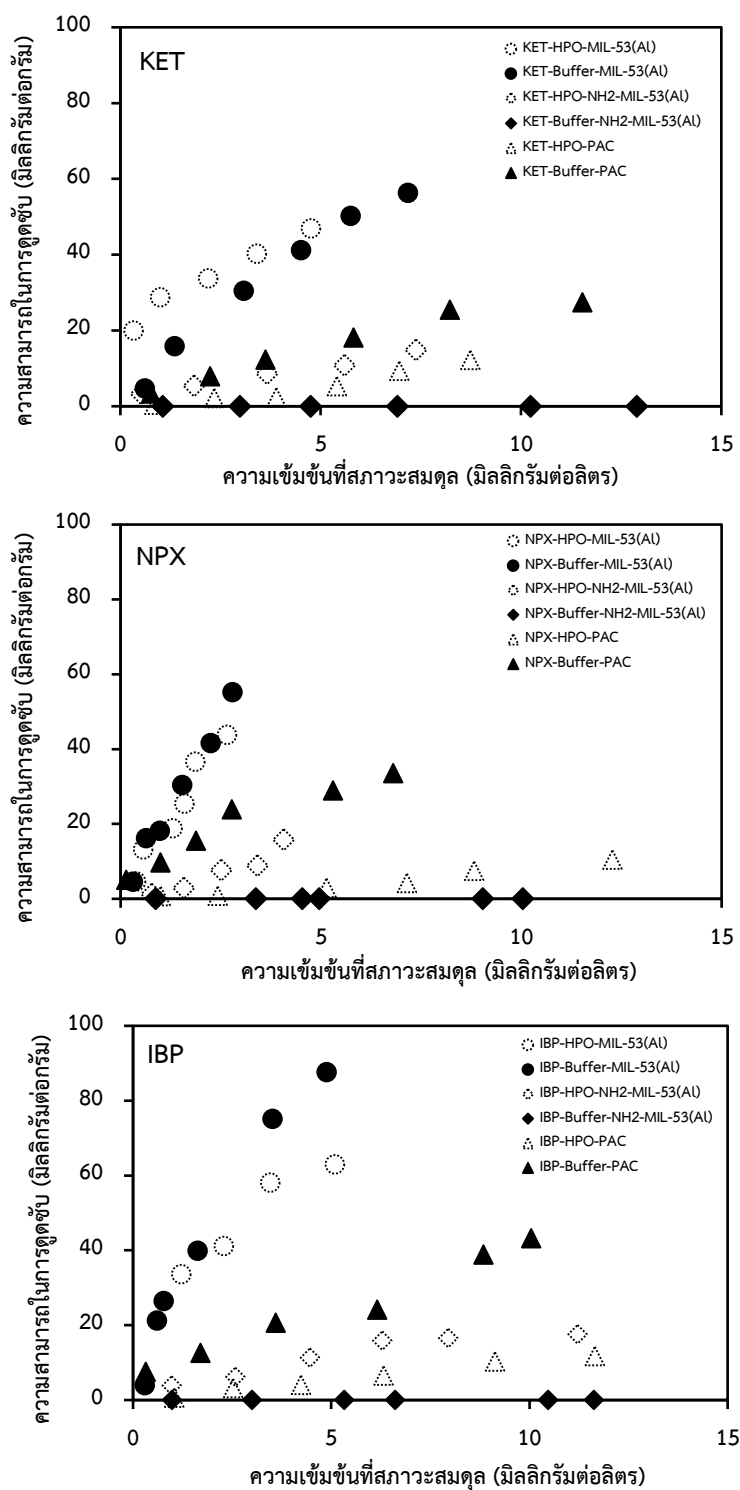
การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ ของยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน โดยตัวกลางดูดซับชนิด MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาสูงสุด รองลงมาคือ NH₂-MIL-53(AI) และ PAC ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-33

โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาไอบูโพรเฟนสูงสุด รองลงมาคือ คีโตโพรเฟน และนาพรอกเซน มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 63, 47, และ 43.8 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมมูล 5.1, 4.8, และ 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับเมื่ออยู่ร่วมกับ HPO กับในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า MIL-53(AI) สามารถดูดซับคีโตโพรเฟนได้สูงขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับ HPO (เช่นเดียวกับในกรณีการมีอยู่ของ DOM) ซึ่งอาจเกิดจากการขยายตัวของรูพรุนทำให้การเข้าสู่รูพรุนของคีโตโพรเฟนเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ในกรณีนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPO ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังเช่นอภิปรายไว้ในกรณีการดูดซับยาในกรณีที่มี DOM ส่งผลให้การดูดซับของนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก HPO นั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน ทำให้เกิดการแข่งขันการดูดซับระหว่าง MIL-53(AI) และ HPO แต่เนื่องจากผลกระทบของ HPO ต่อการดูดซับนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนมีน้อย จึงอาจกล่าวได้ว่านาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนนั้นมีความชอบในการดูดซับกับ MIL-53(AI) มากกว่าการดูดซับกับ HPO

NH₂-MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาไอบูโพรเฟนสูงสุด รองลงมาคือ นาพรอกเซน และคีโตโพรเฟน มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 17.5, 15.7, และ 14.8 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมมูล 11.2, 4.1, และ 7.4 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับเมื่ออยู่ร่วมกับ HPO กับในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเมื่อยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน อยู่ร่วมกับ HPO พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบของฟอสเฟตจากฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ความสามารถในการดูดซับของ PAC มีความสามารถในการดูดซับยาซีโตโปรเฟนสูงสุด รองลงมาคือไอบูโพรเฟน และนาพรอกเซน มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 12.2, 11.7, และ 10.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมมูล 8.7, 11.6, และ 12.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับเมื่ออยู่ร่วมกับ HPO กับในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่ามีความสามารถในการดูดซับยาซีโตโปรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมาก อาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง HPO และยาทั้งสามชนิดทำให้การดูดซับของ PAC ลดลงเนื่องจากการแย่งชิงการดูดซับระหว่าง PAC และ HPO ในกรณีการดูดซับยาไอบูโพรเฟน และนาพรอกเซน





รูปที่ 4- 33 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของยาคีโตนีโพรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนระหว่างร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) และในสารละลายบัฟเฟอร์ (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC

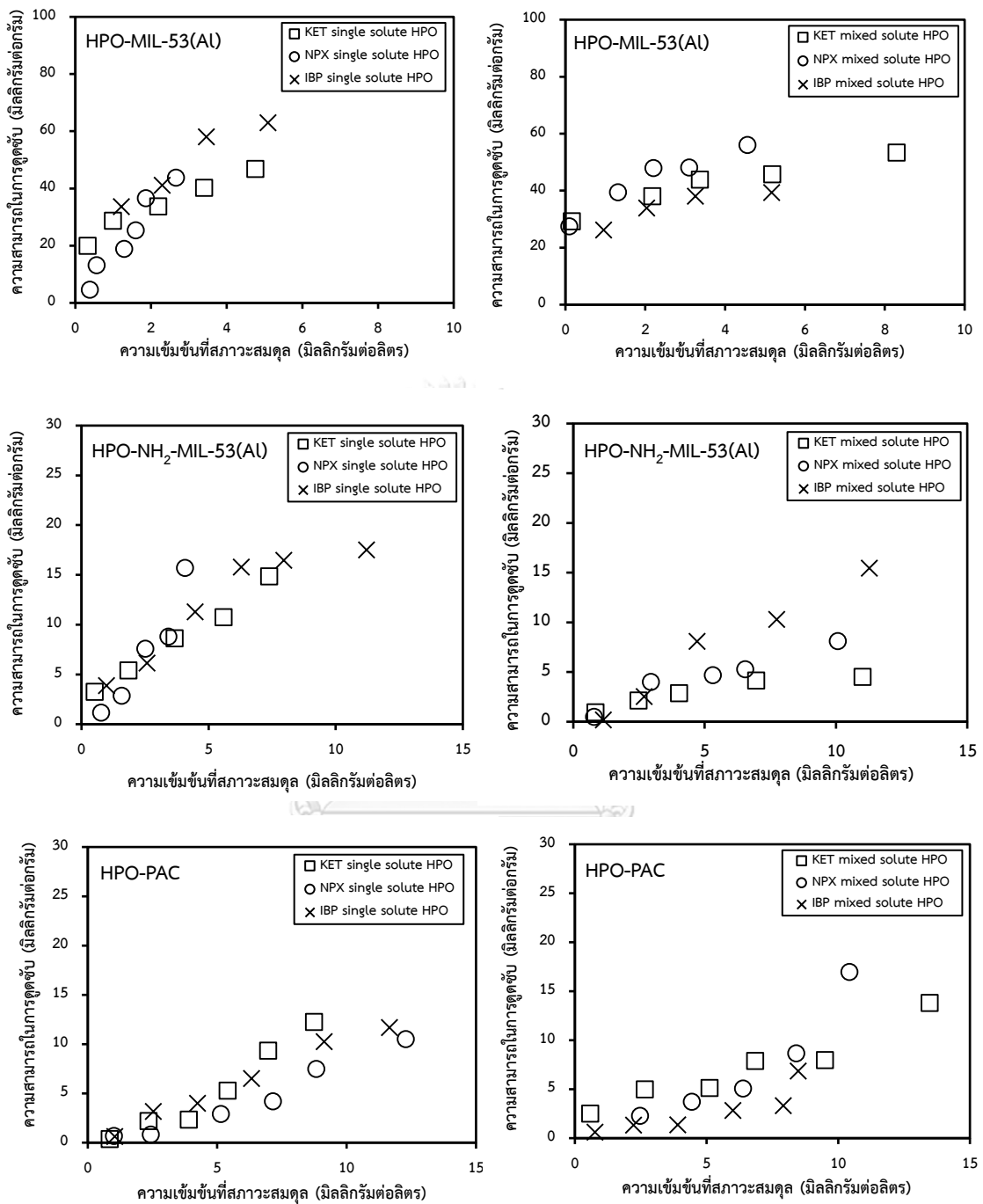
4.4.3.2.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ (HPO) ต่อการดูดซับ สารตกค้างจากยาแบบผสมสารผสม

จากการศึกษาการดูดซับของยาแบบผสมคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPO โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับ ยาสูงที่สุด รองลงมาคือ NH₂-MIL-53(AI) และสุดท้ายคือ PAC แสดงดังรูปที่ 4-34

การดูดซับโดย MIL-53(AI) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยาแบบเดี่ยว และแบบผสมร่วมกับ HPO พบว่าความสามารถในการดูดซับยาแบบผสมมีความสามารถในการดูดซับ ไม่แตกต่างกัน อาจเป็นผลมาจาก MIL-53(AI) มีสมบัติการขยายตัวของรูพรุน (Breathing effect) ซึ่งทำให้สามารถเข้าถึงพื้นที่รูพรุนภายในได้มากขึ้นเมื่อมีมลสารอยู่ในสารละลายมากขึ้นทำให้สามารถ ดูดซับมลสารได้เพิ่มมากขึ้น

สำหรับการดูดซับโดย NH₂-MIL-53(AI) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่าง ยาแบบเดี่ยวและแบบผสมร่วมกับ HPO พบว่าความสามารถในการดูดซับคีโตโพรเฟนร่วมกับ HPO ยาแบบผสมลดลง ความสามารถในการดูดซับนาพรอกเซนร่วมกับ HPO แบบยาผสมลดลง ความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPO แบบยาผสมไม่เปลี่ยนแปลง การดูดซับที่เกิดขึ้น อาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับจึงต้องแบ่งพื้นที่ในการดูดซับ ซึ่งอาจเกิดจากหมู่เอมีน ในโครงสร้างของ NH₂-MIL-53(AI) อาจเกิดการขัดขวางการเข้าถึงของยาซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของยา จึงทำให้ไอบูโพรเฟนมีความสามารถในการดูดซับไม่เปลี่ยนแปลง และมีความสามารถในการดูดซับ มากกว่ายาคีโตโพรเฟนและนาพรอกเซน

การดูดซับโดย PAC พบว่าความสามารถในการดูดซับคีโตโพรเฟนร่วมกับ HPO แบบยาผสม มีความสามารถในการดูดซับลดลง ความสามารถในการดูดซับนาพรอกเซนร่วมกับ HPO แบบยาผสม ลดลงเพียงเล็กน้อย ความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPO แบบยาผสมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ HPO อาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ ในการดูดซับระหว่างยาแต่ละชนิด จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับยาแบบผสมลดลงสำหรับ ยาทุกชนิดเมื่ออยู่กับ HPO

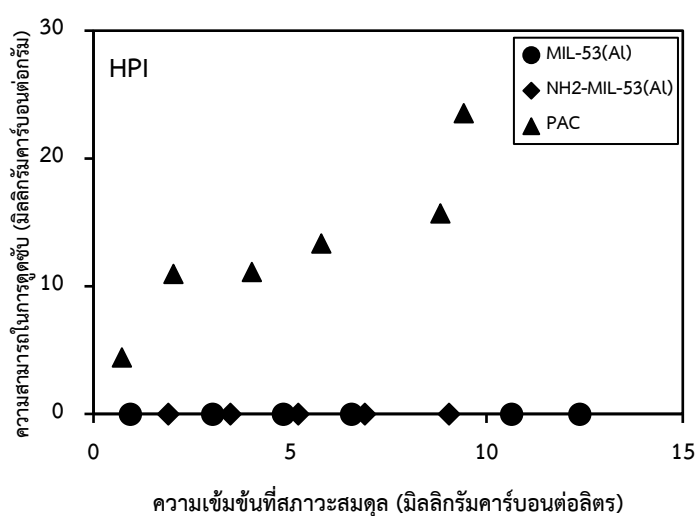


รูปที่ 4- 34 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC (ตามลำดับ)

4.4.3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) ต่อการดูดซับสารตกค้างจากยา

4.4.3.3.1 การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) โดยตัวกลางดูดซับ

การศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำโดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al) และ PAC พบว่า MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) ไม่เกิดการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ เนื่องจากในการทดลองนี้เลือกทริปโตเฟนเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำ ซึ่งอาจเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างทริปโตเฟนกับ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) โดยหมู่เอมีนในโมเลกุลของทริปโตเฟนที่พีเอช 7 จะอยู่ในรูป NH₃⁺ และพื้นผิวของ MIL-53(Al) และ NH₂-MIL-53(Al) จะเป็นประจุบวกส่งผลทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต ในทางกลับกัน PAC เกิดการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำ มีความสามารถในการดูดซับ HPI สูงสุดที่ 23.6 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อกรัม ที่ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล 9.4 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร



รูปที่ 4- 35 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำโดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC

4.4.3.3.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) ต่อการดูดซับสารตกค้างทางยาแบบมลสารเดี่ยว

การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่ชอบน้ำ โดยประกอบไปด้วย ยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ PAC ส่วน NH₂-MIL-53(AI) นั้นไม่เกิดการดูดซับขึ้น แสดงดังรูปที่ 4-36

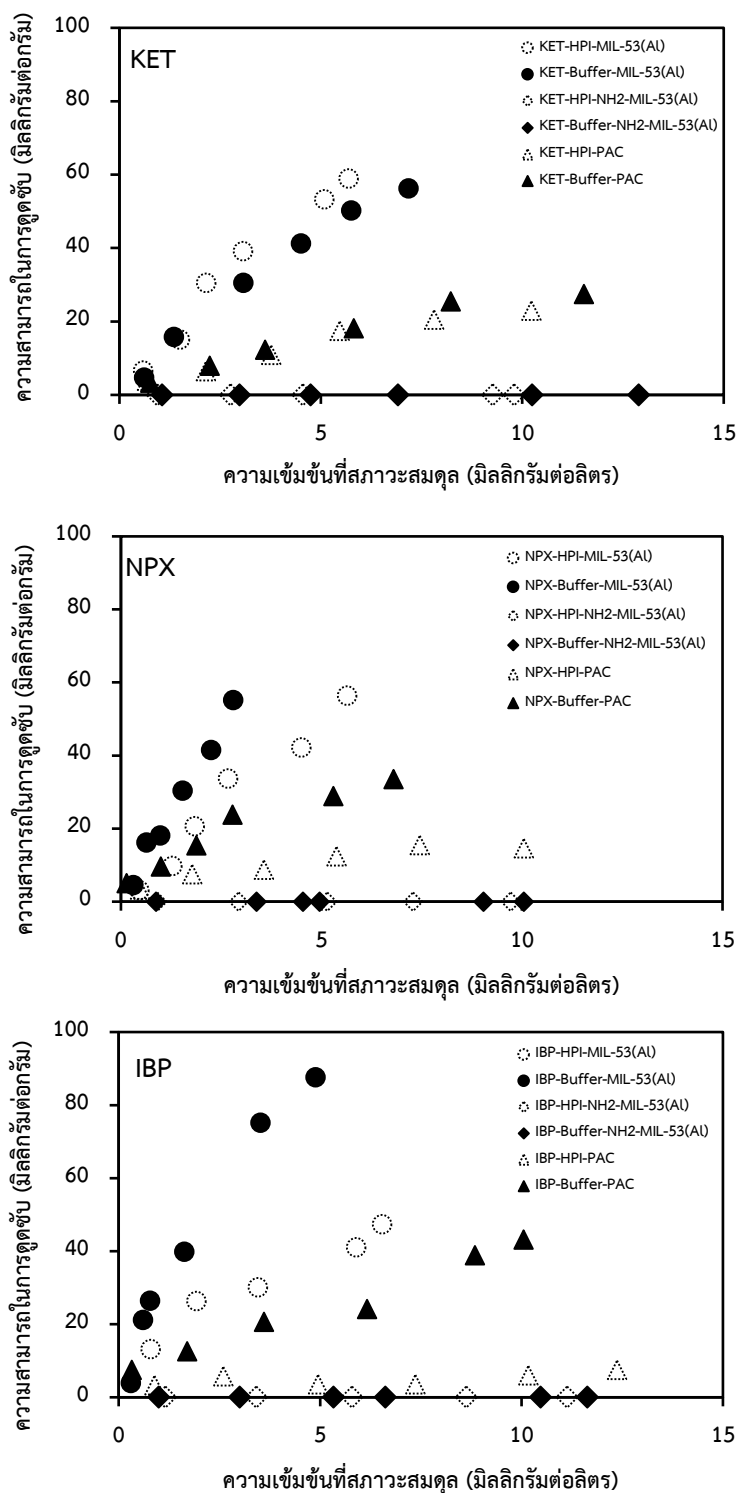
MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาคีโตโพรเฟนสูงสุด รองลงมาคือ นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ตามลำดับ โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 59, 56.5, และ 47.4 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความเข้มข้นสมดุล 5.7, 5.6, และ 6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับของ MIL-53(AI) พบว่าคีโตโพรเฟนเมื่ออยู่ร่วมกับ HPI มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์เล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPI ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์ อาจเป็นผลมาจากนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนนั้นอาจเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับทริปโตนซึ่งเป็นตัวแทนของ HPI ได้ จึงอาจเกิดการแย่งชิงการดูดซับนาพรอกเซนหรือไอบูโพรเฟนระหว่าง MIL-53(AI) และทริปโตน แต่นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนอาจจะมีค่าชอบในการดูดซับบน MIL-53(AI) มากกว่าทริปโตน จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับยาเมื่ออยู่ร่วมกับ HPI นั้นลดลง การดูดซับยาในกรณีนี้อาจมีปัจจัยของปรากฏการณ์ขยายรูพรุนของ MIL-53(AI) เมื่ออยู่ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ (ซึ่งเห็นได้ชัดในกรณีคีโตโพรเฟน)

NH₂-MIL-53(AI) ไม่เกิดการดูดซับทั้งคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน อาจเป็นผลมาจากการทดลองนี้ทำการทดลองภายใต้การควบคุมพีเอชและความแรงไอออนด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ซึ่งอาจจะได้รับผลกระทบจากฟอสเฟตเช่นเดียวกับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์จึงไม่เกิดการดูดซับขึ้น

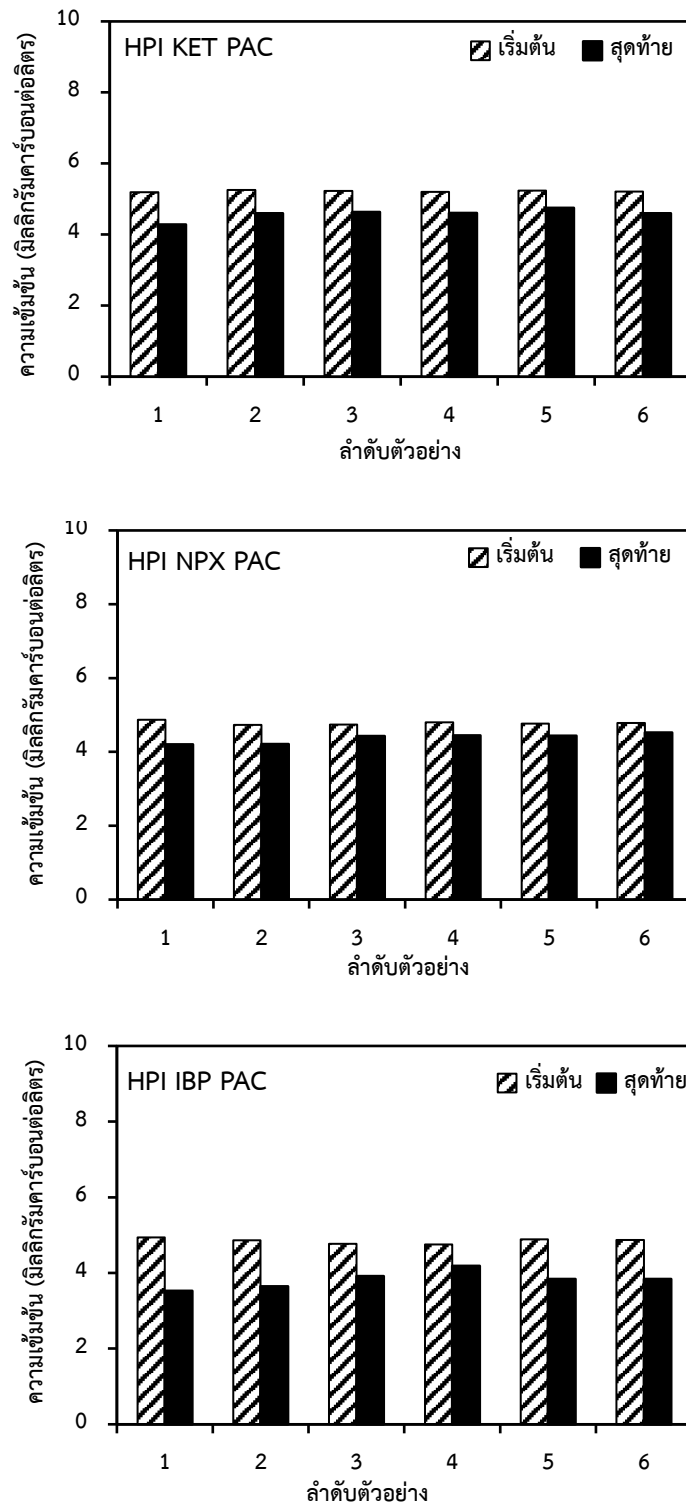
ความสามารถในการดูดซับของ PAC พบว่าการมีอยู่ของ HPI ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับยาคีโตโพรเฟนไม่ลดลงมากนัก แต่ความสามารถในการดูดซับยานาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยความสามารถในการดูดซับยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนมีค่าเท่ากับ 23, 14.7, และ 7.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (ความเข้มข้นสมดุล 10.2, 10, และ 12.4 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ การดูดซับที่ลดลงนี้

อาจเป็นผลมาจากการมีอยู่ของ HPI จึงเกิดการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับระหว่าง HPI (ทริบิโตนเฟน) และยา บน PAC โดยสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของ HPI (ทริบิโตรเฟน) ที่ลดลงในทุกๆตัวอย่าง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับ HPI ของ PAC ในทุกตัวอย่าง (แสดงดังรูปที่ 4-37) จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับยานั้นลดลงในกรณีที่มี HPI อยู่ร่วมด้วย





รูปที่ 4- 36 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของยาคีโโตโปรเฟน นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟนระหว่างร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำและในสารละลายบัฟเฟอร์ (ตามลำดับ) โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC



รูปที่ 4- 37 แผนภูมิแท่งความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ชอบน้ำร่วมกับ ยามลสารเดี่ยวที่ดูดซับโดย PAC

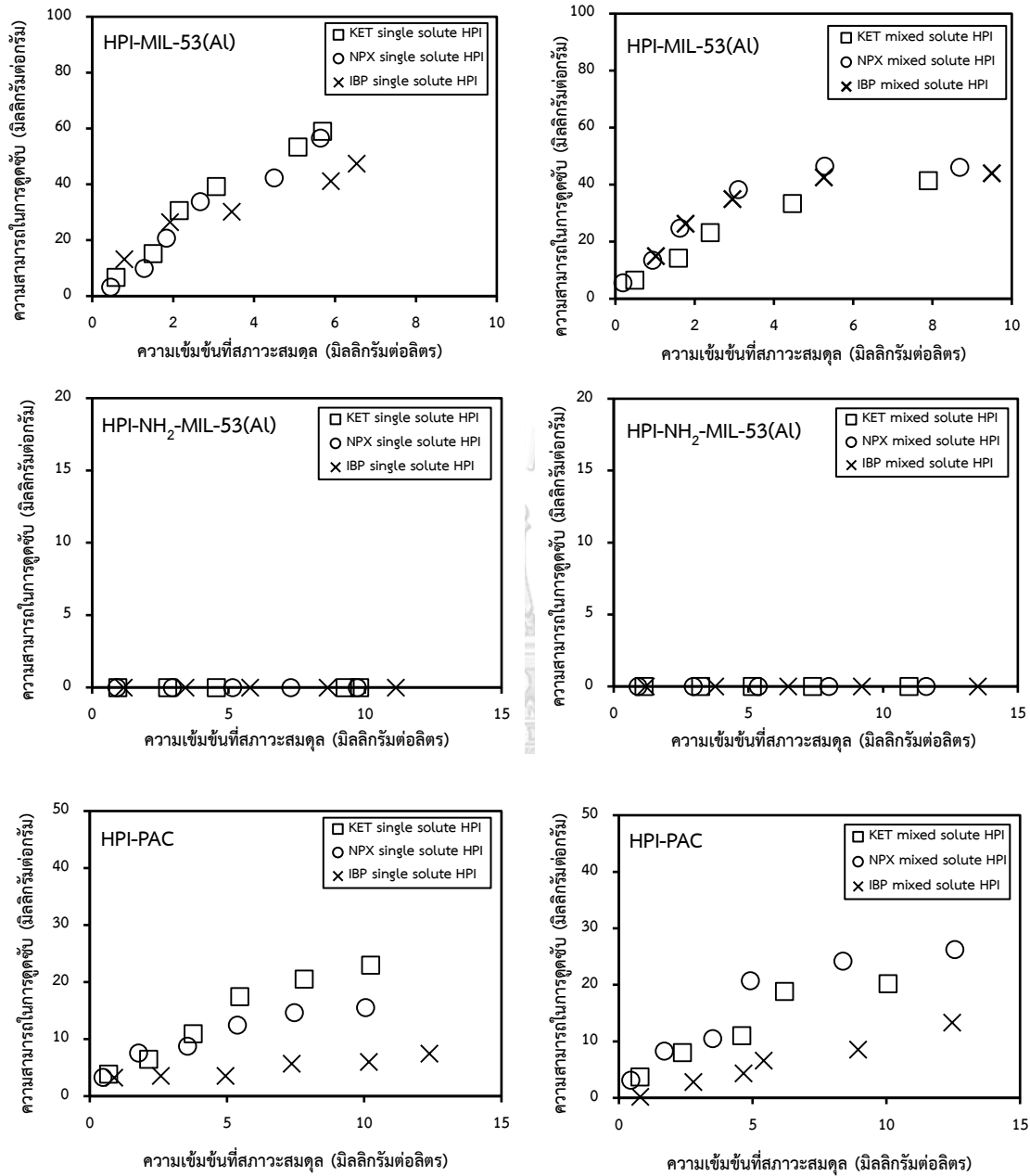
4.4.3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (HPI) ต่อการดูดซับ สารตกค้างจากยาแบบมลสารผสม

จากการศึกษาการดูดซับของยาแบบผสมคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPI โดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับ ยาสูงที่สุด รองลงมาคือ PAC และสุดท้ายคือ NH₂-MIL-53(AI) แสดงดังรูปที่ 4-38

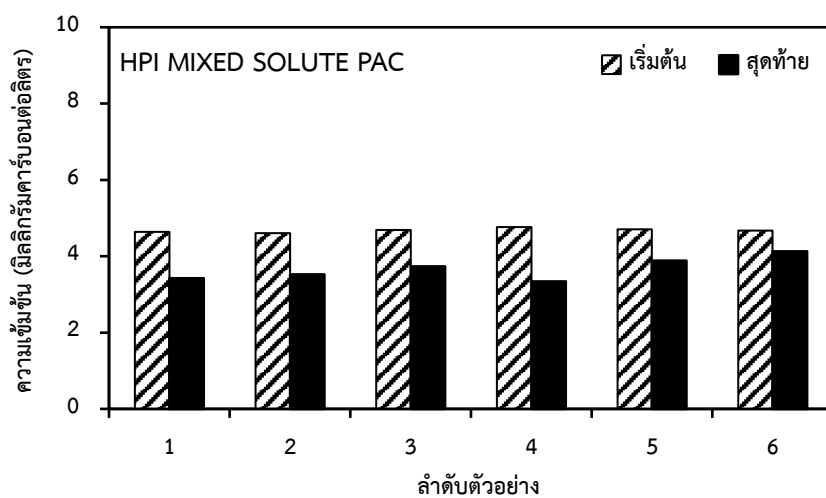
การดูดซับโดย MIL-53(AI) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยาแบบเดี่ยว และแบบผสมร่วมกับ HPI พบว่าความสามารถในการดูดซับยาแบบผสมมีความสามารถในการดูดซับ ลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับบนตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI) แต่เมื่อมองถึงความสามารถในการดูดซับมลสารโดยรวมพบว่า MIL-53(AI) สามารถดูดซับมลสาร (ยา) ได้สูงมากขึ้นโดยไม่เกิดการคัดเลือก แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการขยายรูพรุนของ MIL-53(AI) ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์ในวัฏภาคน้ำสูงขึ้น

ในส่วนของ NH₂-MIL-53(AI) ไม่เกิดการดูดซับทั้งคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ร่วมกับ HPI เช่นเดียวกันกับการดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ HPI ซึ่งเกิดจากผลกระทบของฟอสเฟต จากฟอสเฟตบัฟเฟอร์

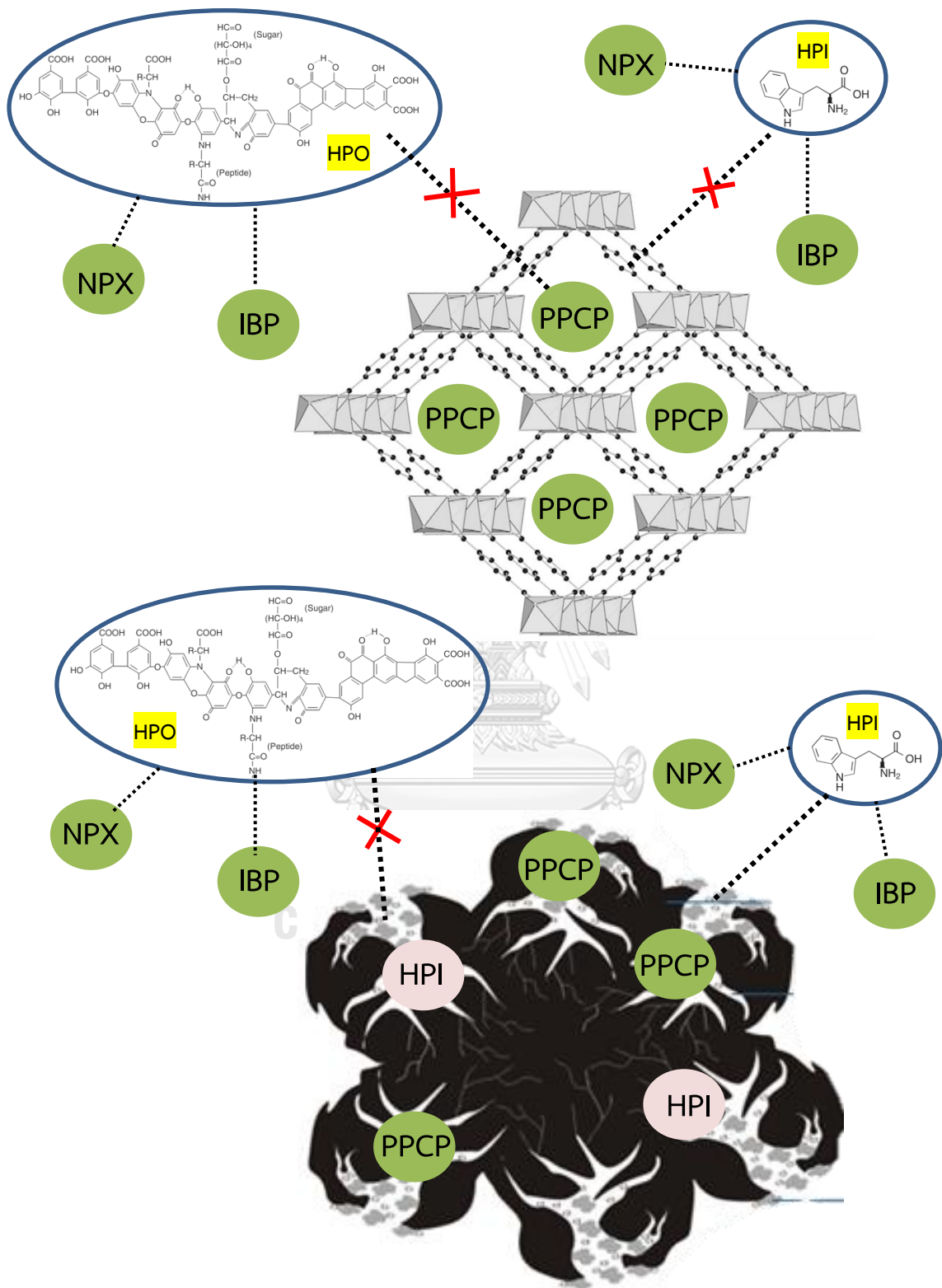
การดูดซับโดย PAC พบว่าความสามารถในการดูดซับคีโตโพรเฟนร่วมกับ HPI แบบผสม มีความสามารถในการดูดซับลดลง ความสามารถในการดูดซับนาพรอกเซนร่วมกับ HPI แบบผสม เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความสามารถในการดูดซับไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPI แบบผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ HPI อาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ ในการดูดซับระหว่างยาแต่ละชนิด และการมีอยู่ของ HPI ไม่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับโดยรวม มากนัก ซึ่งอาจเกิดจากการที่ PAC สามารถดูดซับ HPI (ทริปโตเฟน) ได้โดยกลไกที่แตกต่างจากกรณี การดูดซับยาทั้งสามชนิด ซึ่งคาดว่าพันธะ π - π stacking ระหว่างยากับพื้นผิว PAC น่าจะมีบทบาท สำคัญและแตกต่างจากกรณี HPI (ทริปโตเฟน)



รูปที่ 4- 38 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างยามลสารเดี่ยวและยามลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำโดย MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC (ตามลำดับ)



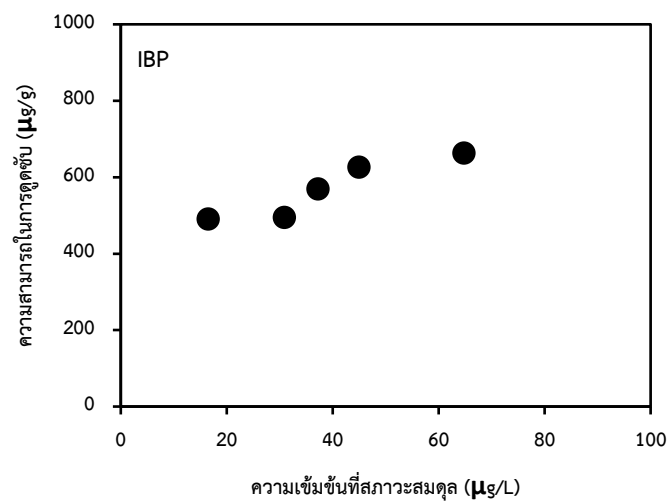
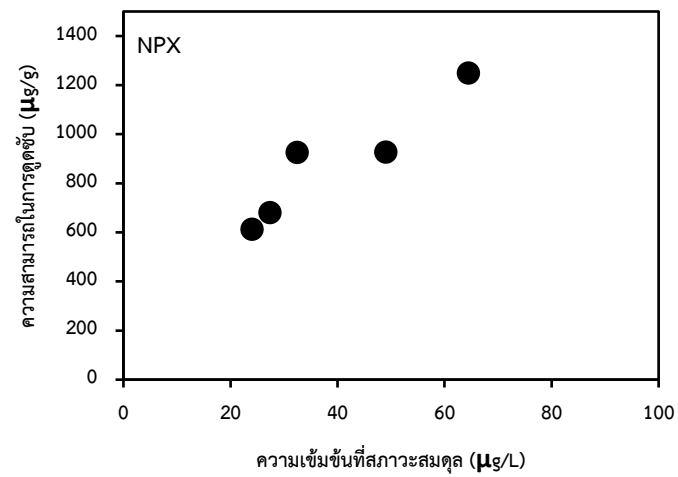
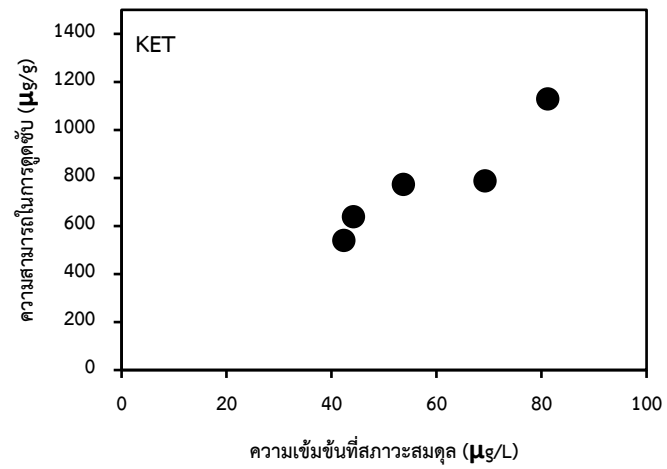
รูปที่ 4- 39 แผนภูมิแท่งความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ชอบน้ำร่วมกับยา
มลสารผสมที่ดูดซับโดย PAC



รูปที่ 4- 40 กลไกการดูดซับที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการดูดซับสารตกค้างจากยาร่วมกับสารอินทรีย์ ละลายน้ำโดย MIL-53(Al) (บน) และ PAC (ล่าง)

4.4.4 การดูดซับสารตกค้างจากยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่ำ

การศึกษาการดูดซับยาให้มีความใกล้เคียงสภาวะจริงจึงทำการศึกษาที่ความเข้มข้นต่ำ โดยการดูดซับยา คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ในน้ำเสียสังเคราะห์หมลสารเดี่ยว ดำเนินการที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของยาในระดับ ppb โดยตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI) ซึ่งความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ความเข้มข้นสูง ผลของความสามารถในการดูดซับและความเข้มข้นของสมมูลนั้นแสดงในหน่วยของ $\mu\text{g/g}$ และ $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-40 โดยพบว่าการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำโดย MIL-53(AI) ของยานาพรอกเซนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 1,249.5 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นที่สภาวะสมมูล 64.4 ไมโครกรัมต่อลิตร รองลงมาคือคีโตโพรเฟน มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 1,130.6 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นที่สภาวะสมมูล 81.2 ไมโครกรัมต่อลิตร และสุดท้ายคือไอบูโพรเฟนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 663 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นที่สภาวะสมมูล 64.7 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นสูง โดยทั่วไปแล้วการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำจะมีรูปแบบไอโซเทอมเป็นเส้นตรงในช่วงเริ่มต้นของกราฟไอโซเทอม



รูปที่ 4- 41 ไอโซเทอมการดูดซับยาคีโตนีโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน(ตามลำดับ)
ที่ความเข้มข้นต่ำโดย MIL-53(A)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการสังเคราะห์ MIL-53(AI) และทำการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีน ($\text{NH}_2\text{-MIL-53(AI)}$) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนในน้ำเสียสังเคราะห์ ศึกษาการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำเสียโรงพยาบาล สารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ทั้งมลสารยาชนิดเดี่ยวและมลสารยาผสม เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) โดยการทดลองแบบทีละเท

5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

จากการศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางดูดซับที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นได้ทั้งหมด พบว่าโครงสร้างของ MIL-53(AI) และ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(AI)}$ ได้รับการยืนยันโดยลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึก XRD อีกทั้งทำการยืนยันผลการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันเอมีนโดย FT-IR และการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน (CHNS/O) พบว่าหมู่ฟังก์ชันเอมีนมีอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับจริง การวิเคราะห์ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของ MIL-53(AI) และ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(AI)}$ โดยใช้การดูดซับไนโตรเจนไอโซเทอมพบว่าภายหลังการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันส่งผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดซับลดลง

5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการอันดับหนึ่งเหมือน อันดับที่สองเหมือน และสมการริชชี จลนพลศาสตร์การดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนบนตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI), $\text{NH}_2\text{-MIL-53(AI)}$, และ PAC พบว่า MIL-53(AI) สามารถดูดซับได้เร็วที่สุดโดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 75 นาที ซึ่งเร็วกว่า PAC ในส่วน $\text{NH}_2\text{-MIL-53(AI)}$ ไม่เกิดการดูดซับขึ้น จลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งหมดมีความเข้ากันกับสมการอันดับที่สองเหมือน

กลไกการแพร่กระจายของ Intraparticle ของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน บน MIL-53(Al) และ PAC พบทั้งสามชั้นตอนโดยชั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วในการดูดซับ ไอบูโพรเฟนสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของ MIL-53(Al) ได้ง่ายกว่ายาอีกสองชนิด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ PAC ขนาดรูพรุนของ MIL-53(Al) พบว่าลักษณะของรูพรุนมีผลความสำคัญต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับ เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่าและเป็นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ (Uniform) และสามารถยืดหยุ่นได้ (Breathing effect) ทำให้การเข้าถึงพื้นที่ผิวภายในเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า PAC ที่มีขนาดรูพรุนที่หลากหลายและไม่สม่ำเสมอ

5.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ชนิดมลสารเดี่ยวในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า MIL-53(Al) มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองมาคือ PAC โดยการมีอยู่ของฟอสเฟตจากฟอสเฟตบัพเฟอร์ส่งผลให้ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ ไม่เกิดการดูดซับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับของ MIL-53(Al) ในการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน มีเหมาะสมที่สุดกับไอโซเทอมชิปส์, เส้นตรง, และแลงเมียร์ ตามลำดับ PAC พบว่าผลการดูดซับคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน มีเหมาะสมที่สุดกับไอโซเทอมแลงเมียร์, แลงเมียร์, และเส้นตรง ตามลำดับ แรงที่เป็นไปได้ในการดูดซับยาทั้งสามชนิดบน MIL-53(Al) คือแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต พันธะไฮโดรเจน รวมถึงการเกิดพันธะ $\pi\text{-}\pi$

5.1.4 การศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์แบบยวมลสารผสม

จากการศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์ การดูดซับในมลสารผสมไม่ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงนั้นเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Breathing effect ในส่วนของ PAC มีความสามารถในการดูดซับยาลดลงอย่างมากอาจเป็นผลมาจากการแย่งชิงพื้นที่ของยาบนตัวกลางดูดซับ

5.1.5 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารยาเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยวร่วมกับ DOM พบว่า MIL-53(Al) มีความสามารถในการดูดซับยาสูงสุด รองลงมาคือ $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ และ PAC ตามลำดับ เมื่อยาคีโตโพรเฟนอยู่ร่วมกับ DOM ส่งผลทำให้การดูดซับคีโตโพรเฟนสูงขึ้น ในส่วนของนาพรอกเซน

และไอบูโพรเฟน เมื่อร่วมกับ DOM มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากการแข่งขันการดูดซับยาระหว่างตัวกลางดูดซับและ DOM โดย DOM ไม่ถูกดูดซับจากตัวกลางดูดซับใดเลย ความสามารถในการดูดซับยาคีโตโพรเฟนที่อยู่ร่วมกับ DOM ผลของ Breathing effect และผลกระทบของฟอสเฟตทำให้การดูดซับยาโดย MIL-53(AI) และ NH₂-MIL-53(AI) สูงขึ้น

5.1.6 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำ

ในการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารผสมร่วมกับ DOM โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับที่ลดลงอาจเป็นผลของการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับของยาแต่ละชนิด ในส่วนของ NH₂-MIL-53(AI) ความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างมากเป็นผลจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับและเกิดการขัดขวางการดูดซับจากหมู่เอมีนในโครงสร้าง การดูดซับยาของ PAC มีความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างมากเมื่ออยู่ร่วมกับ DOM เป็นผลจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับของยาแต่ละชนิด และการแย่งชิงพื้นที่การดูดซับ DOM

5.1.7 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ

การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ HPO MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาสูงสุด รองลงมาคือ NH₂-MIL-53(AI) และ PAC ตามลำดับ โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับเป็นผลมาจากการขยายตัวของรูพรุนทำให้การเข้าสู่รูพรุนของคีโตโพรเฟนเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ในกรณีนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนร่วมกับ HPO ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อย อาจเกิดการแข่งขันการดูดซับระหว่าง MIL-53(AI) และ HPO แต่นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนนั้นมีความชอบในการดูดซับกับ MIL-53(AI) มากกว่าการดูดซับกับ HPO ในส่วนของ NH₂-MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับยาไอบูโพรเฟนสูงที่สุด รองลงมาคือนาพรอกเซน และคีโตโพรเฟนตามลำดับ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากฟอสเฟตจากฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความสามารถในการดูดซับของ PAC มีความสามารถในการดูดซับยาคีโตโพรเฟนสูงที่สุด รองลงมาคือไอบูโพรเฟนและนาพรอกเซน แต่ความสามารถต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมาก อาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง HPO และยาทั้งสามชนิดทำให้การดูดซับของ PAC ลดลง

5.1.8 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมัลติสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ

ในการดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมัลติสารผสมร่วมกับ HPO โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับที่ไม่เปลี่ยนแปลงอาจเป็นผลของ Breathing effect ในส่วนของ NH₂-MIL-53(AI) ความสามารถในการดูดซับลดลงยกเว้นไอบูโพรเฟนเป็นผลจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับและเกิดการขัดขวางการดูดซับจากหมู่เอมีนในโครงสร้าง การดูดซับยาของ PAC มีความสามารถในการดูดซับลดลงเป็นผลจากการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับ

5.1.9 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมัลติสารเดี่ยวร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ

การดูดซับยาแบบเดี่ยวร่วมกับ HPI พบว่า MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ PAC ส่วน NH₂-MIL-53(AI) นั้นไม่เกิดการดูดซับขึ้นเนื่องจากฟอสเฟตบัพเพอร์ โดย MIL-53(AI) มีความสามารถในการดูดซับ ยาคีโตโพรเฟนสูงสุด รองลงมาคือ นาพรอกเซน และ ไอบูโพรเฟน เมื่อ HPI อยู่ร่วมกับคีโตโพรเฟนส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ความสามารถลดลงเมื่อ HPI อยู่ร่วมกับนาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน อาจเกิดการแข่งขันการดูดซับระหว่าง MIL-53(AI) และ HPI แต่นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนนั้น มีความชอบในการดูดซับกับ MIL-53(AI) มากกว่าการดูดซับกับของสารทริโพรเฟนที่เป็นตัวแทนของ HPI โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการดูดซับยาในกรณีนี้ยังเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ขยายรูพรุนของ MIL-53(AI)

5.1.10 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมัลติสารผสมร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ

ความสามารถในการดูดซับของ PAC ที่ลดลงนี้อาจเป็นผลมาจากการมีอยู่ของ HPI จึงเกิดการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับระหว่าง HPI และยาบน PAC ทำให้การมีอยู่ของ HPI ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับยาคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนลดลง

5.1.11 การดูดซับสารตกค้างจากยาแบบมลสารเดี่ยวในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น

ต่ำ

ความสามารถในการดูดซับของ MIL-53(AI) ในการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำมีความสามารถในการดูดซับที่ดีและมีความสอดคล้องกับกราฟไอโซเทอมการดูดซับของ MIL-53(AI) ที่ความเข้มข้นสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการดูดซับสารกลุ่มยาต้านการอักเสบที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของมลสารยาร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย
2. ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟอสเฟตบัพเฟอร์
3. ศึกษาการประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับ MIL-53(AI) ที่มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันชนิดอื่นๆ
4. ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับยาร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำจริงและสารอินทรีย์ละลายน้ำตัวแทน (Surrogate)



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ความเข้มข้นคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนโดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงเครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิด Diode array detector (HPLC-DAD) ที่ความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ

เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงเครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิด Diode array detector (HPLC-DAD) รุ่น Agilent 1100 HPLC
2. Stock solution คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ที่ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. เมทานอล (Methanol)
4. เอทานอล (Ethanol)
5. อะซีโตนไนไตรล์ (Acetonitrile)
6. กรดออร์โทฟอสฟอริกร้อยละ 85
7. น้ำกลั่นปราศจากไอออน 18.2 ไมโครซีเมนต์ (DI water)
8. ไมโครปิเปต (Micro pipette)
9. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)

การเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock solution) ที่ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

ตารางที่ ก-1 การเตรียมสารละลาย Stock solution ที่ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ คีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน

ยา	ปริมาณยา (มิลลิกรัม)	ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
คีโตโพรเฟน	50	5
นาพรอกเซน	50	5
ไอบูโพรเฟน	50	5

ละลายยา 50 มิลลิกรัม โดยใช้เอทานอลสำหรับคีโตโพรเฟน และใช้เมทานอลสำหรับนาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน จากนั้นทำการเจือจาง Stock solution 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เป็น 1, 3, 5, 7, 10 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ตามสมการ ;

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

ตัวอย่างการเตรียมคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน 100 มิลลิตรในขวดวัดปริมาตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

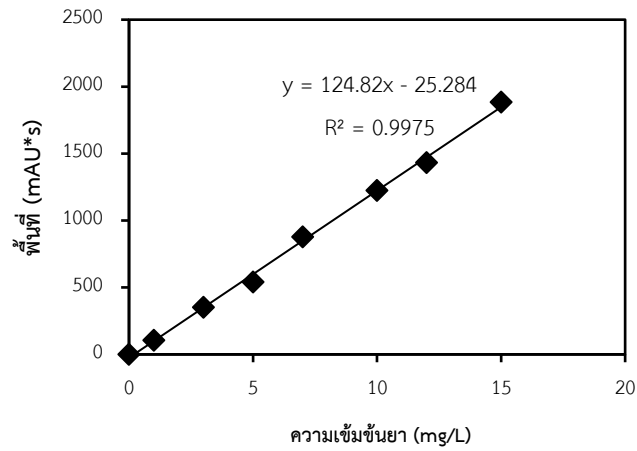
$$10,000 \text{ mg/L} \times V_1 = 1 \text{ mg/L} \times 100 \text{ mL}$$

$$V_1 = 0.01 \text{ mL}$$

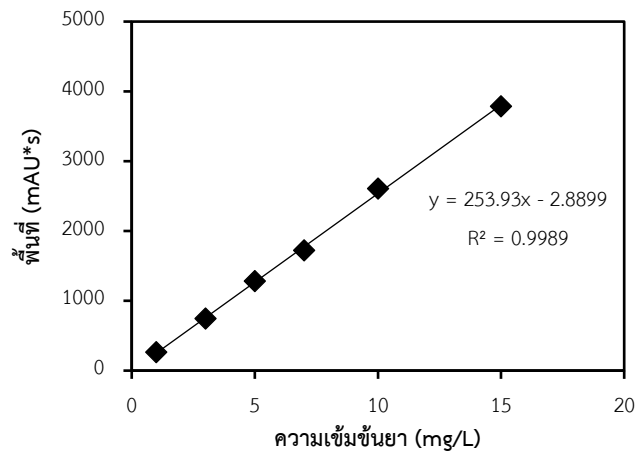
หลังจากนั้นทำการปิเปต Stock solution มา 0.01 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรและปรับปริมาตรให้เป็น 100 mL ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 10 mM ดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 ปริมาตร Stock solution 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ใช้ในการเตรียมความเข้มข้นมาตรฐานที่ความเข้มข้นสูงในหน่วย ppm

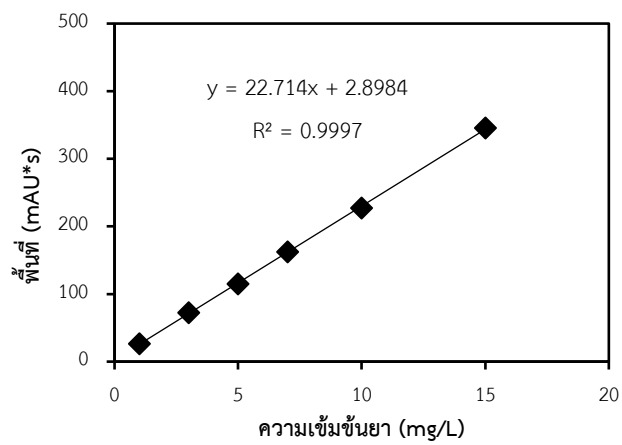
ความเข้มข้นยา (mg/L)	ปริมาตร Stock solution 10,000 ppm (mL)
0.5	0.005
1	0.01
3	0.03
5	0.05
7	0.07
10	0.10
12	0.12
15	0.15



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานคีโตโปรเฟนในสารละลายบัฟเฟอร์



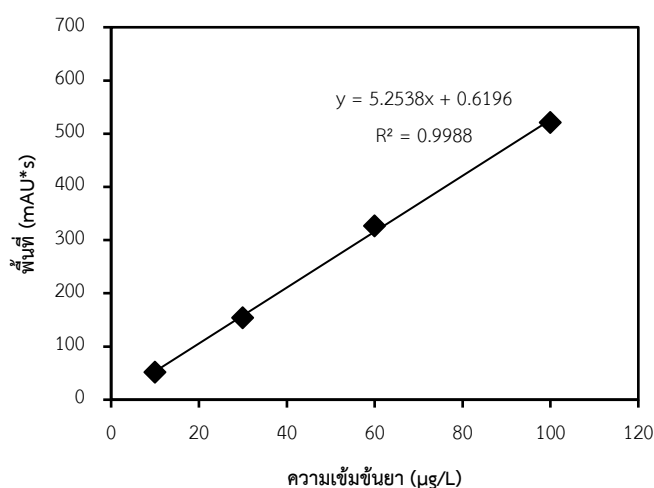
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานนาพรอกเซนในสารละลายบัฟเฟอร์



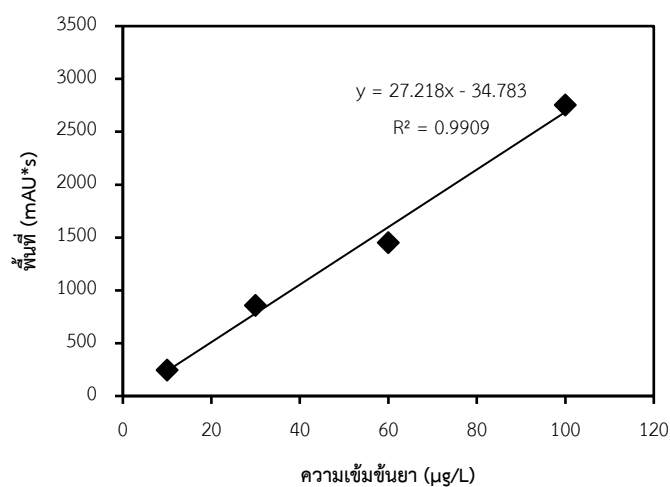
รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไอบูโพรเฟนในสารละลายบัฟเฟอร์

การเตรียมความเข้มข้นมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำในหน่วย ppb โดยทำการเจือจาง Stock solution 10,000 ppm ให้เป็น 100 ppm และเจือจางให้เป็น 1 ppm

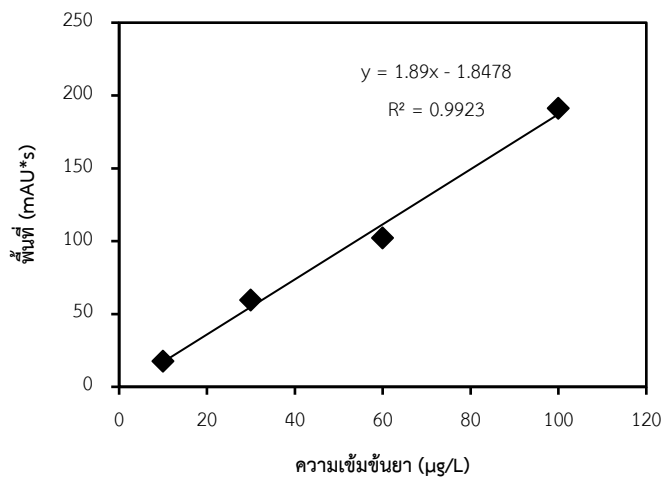
ความเข้มข้นยา ($\mu\text{g/L}$)	ปริมาตร Stock solution 1 ppm (μL)
10	1
30	3
60	6
100	10



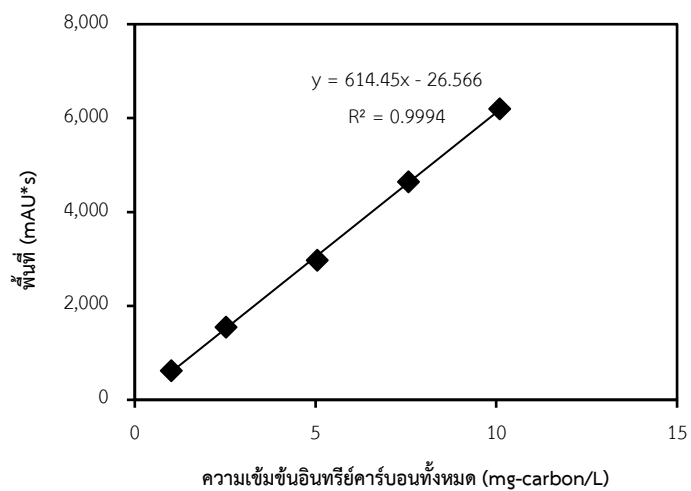
รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานคีโตโปรเฟนที่ความเข้มข้นต่ำในสารละลายบัฟเฟอร์



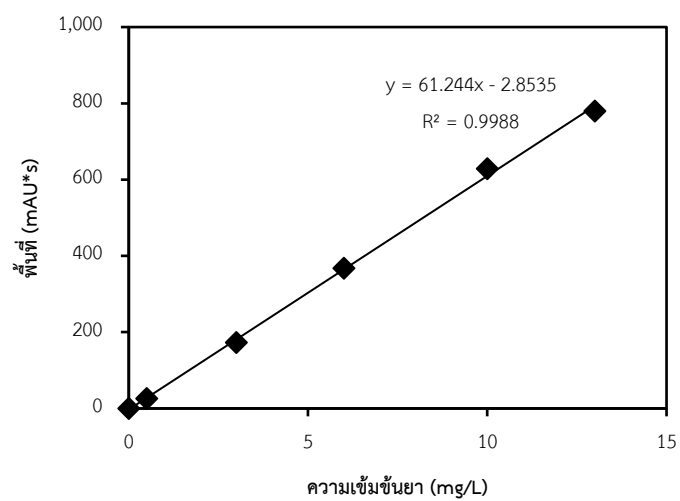
รูปที่ ก-5 กราฟมาตรฐานนาพรอกเซนที่ความเข้มข้นต่ำในสารละลายบัฟเฟอร์



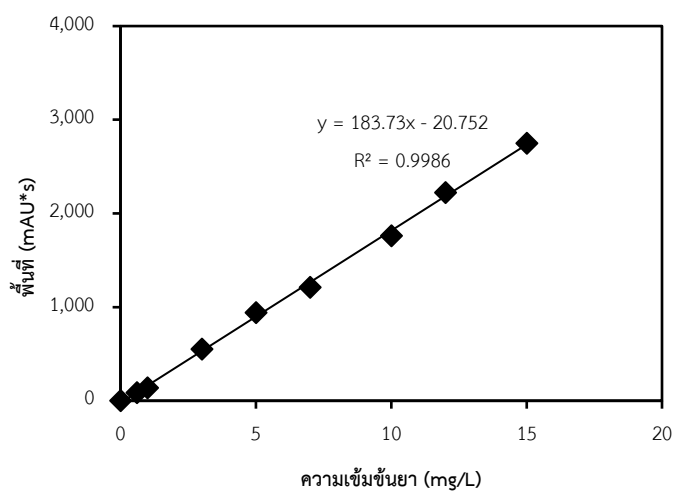
รูปที่ ก-6 กราฟมาตรฐานไอบูโพรเฟนที่ความเข้มข้นต่ำในสารละลายบัฟเฟอร์



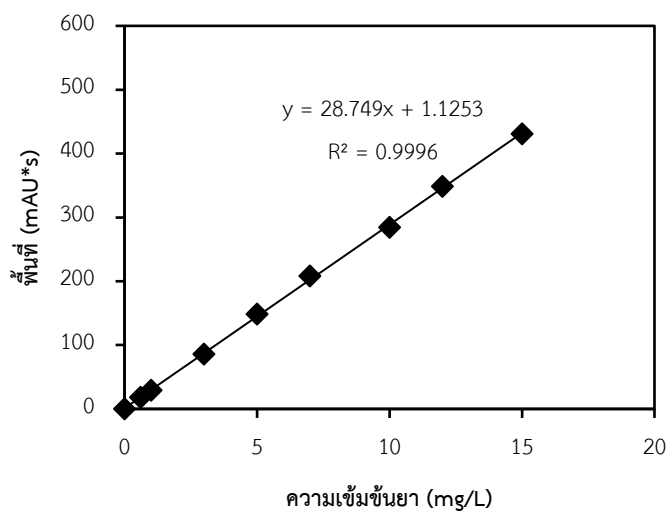
รูปที่ ก-7 กราฟมาตรฐานสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียจริง



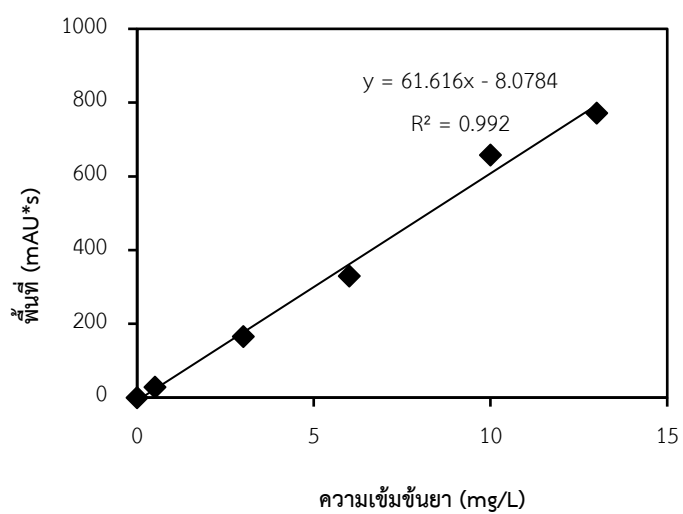
รูปที่ ก-8 กราฟมาตรฐานสารละลายคีโตโปรเฟนในน้ำเสียจริง



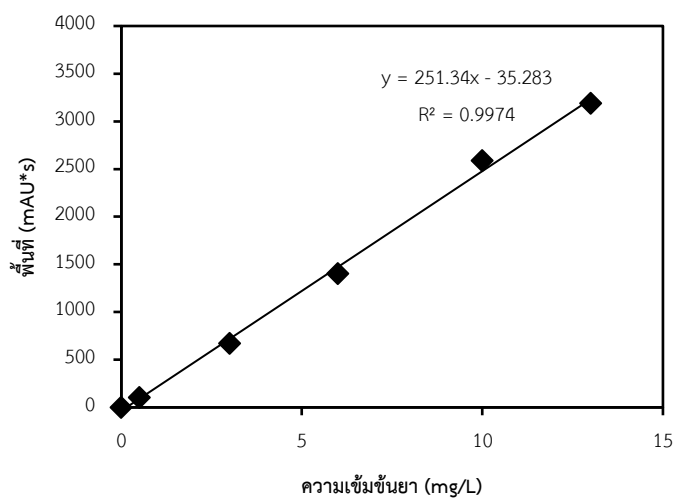
รูปที่ ก-9 กราฟมาตรฐานสารละลายนาพรอกเซนในน้ำเสียจริง



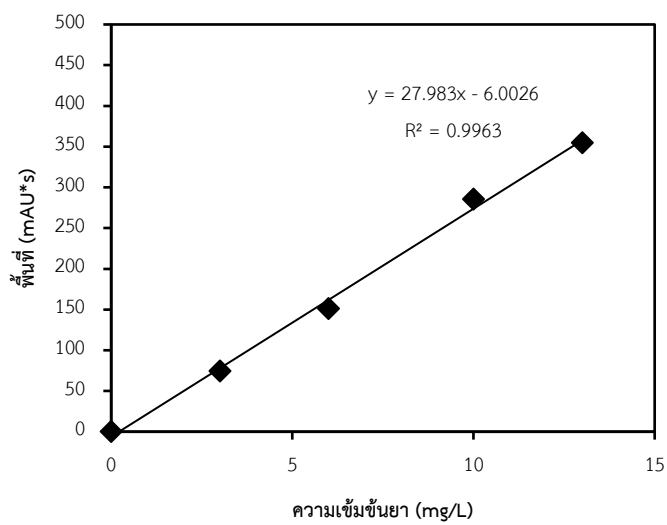
รูปที่ ก-10 กราฟมาตรฐานสารละลายไอบูโพรเฟนในน้ำเสียจริง



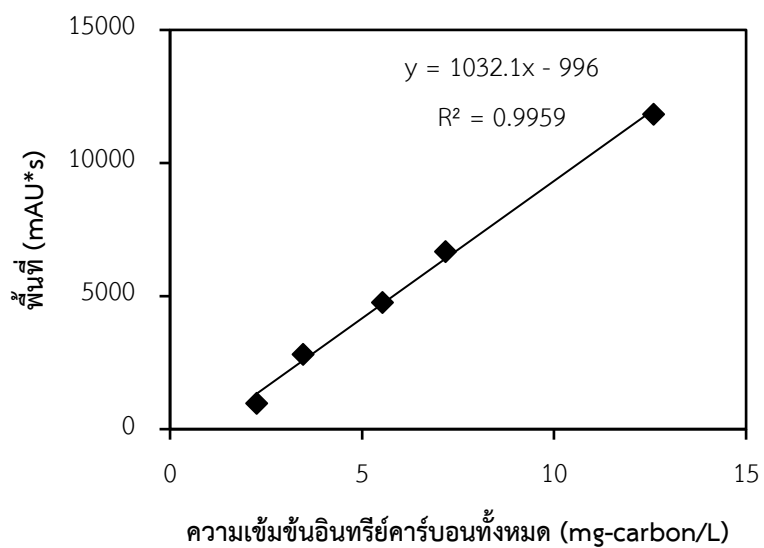
รูปที่ ก-11 กราฟมาตรฐานสารละลายคีโตโพรเฟนในน้ำเสียจริงมลสารยาผสม



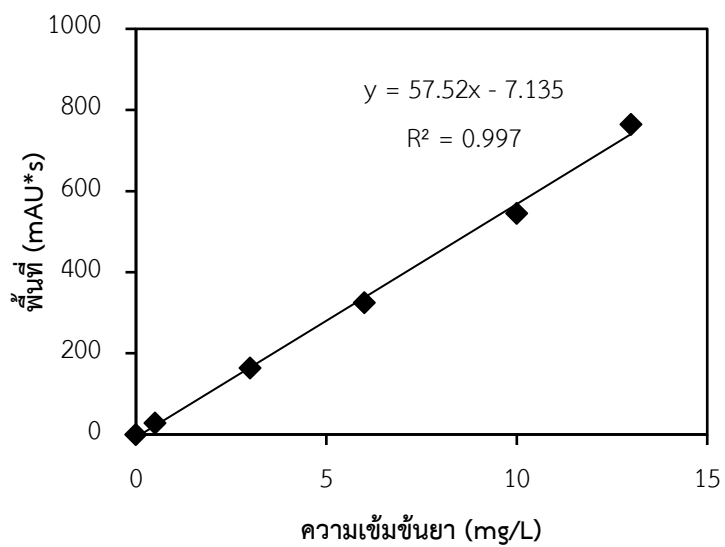
รูปที่ ก-12 กราฟมาตรฐานสารละลายนาพโรคเซนในน้ำเสียจริงมลสารยาผสม



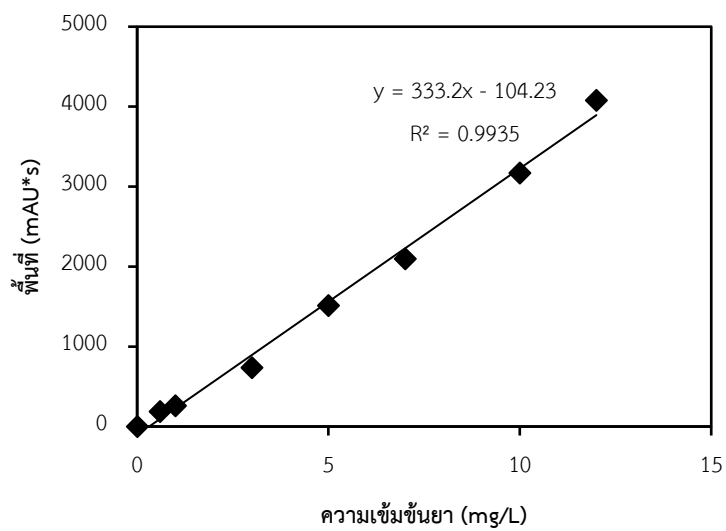
รูปที่ ก-13 กราฟมาตรฐานสารละลายไอบูโพรเฟนในน้ำเสียจริงมลสารยาผสม



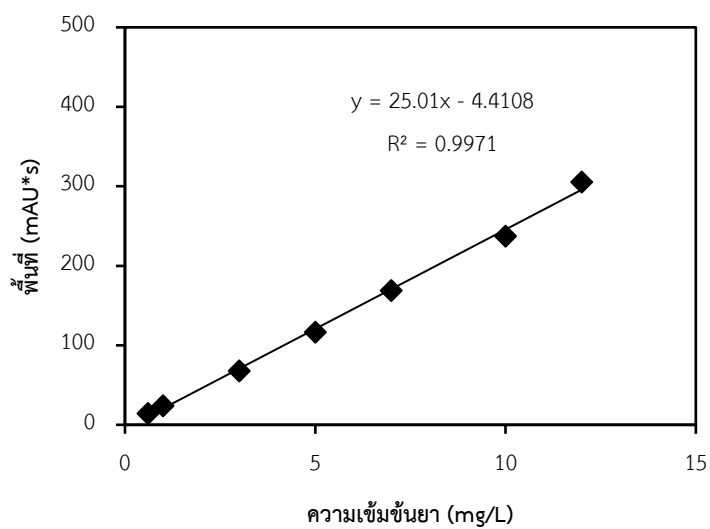
รูปที่ ก-14 กราฟมาตรฐานสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ



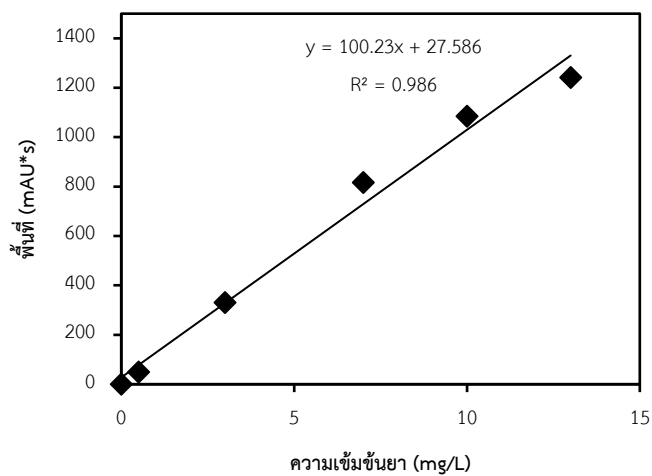
รูปที่ ก-15 กราฟมาตรฐานคีโตโพรเฟนในสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ



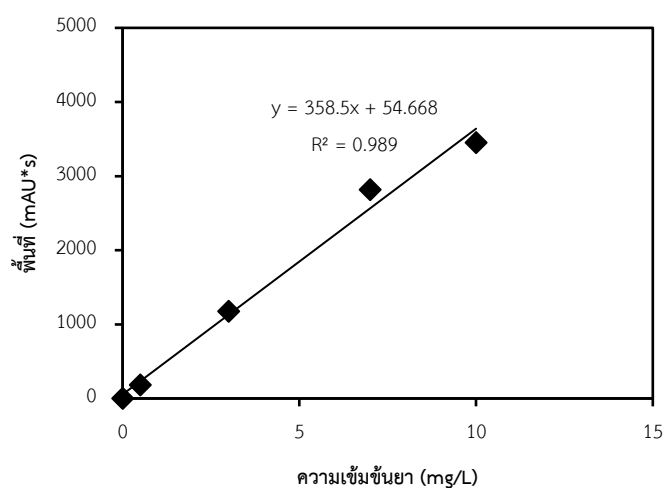
รูปที่ ก-16 กราฟมาตรฐานนาพรอกเซนในสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ



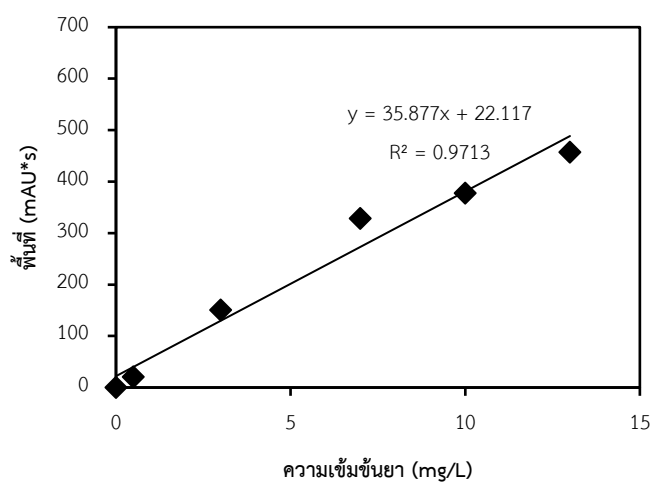
รูปที่ ก-17 กราฟมาตรฐานไอบูโพรเฟนในสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำ



รูปที่ ก-18 กราฟมาตรฐานคิโตโปรเฟนในสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำมลสารยาผสม



รูปที่ ก-19 กราฟมาตรฐานนาพรอกเซนในสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำมลสารยาผสม



รูปที่ ก-20 กราฟมาตรฐานไอบูโพรเฟนในสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำมลสารยาผสม





ภาคผนวก ข

ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับคีโตโพรเฟนของ MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC ในฟอสเฟตบัพเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

MIL-53(Al) KET		NH ₂ -MIL-53(Al) KET		PAC KET	
เวลา(นาที)	qt	เวลา(นาที)	qt	เวลา(นาที)	qt
1	13.78	0.5	0	1	2.30
3	19.02	1	0	3	4.22
5	27.21	3	0	5	5.93
10	31.43	5	0	10	7.19
15	34.03	7	0	15	8.36
20	35.74	10	0	20	11.15
30	37.23	15	0	30	14.70
40	37.60	20	0	40	18.52
50	38.63	25	0	50	21.69
60	39.79	30	0	60	21.98
75	41.36	45	0	75	25.67
90	42.06	60	0	90	24.96
120	42.46	75	0	120	27.41
180	42.70	90	0	180	28.69
240	43.19	120	0	240	30.36
300	43.52	180	0	300	32.63
360	43.56	240	0	360	34.01
		300	0		
		360	0		

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับนาพรอกเซนของ MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC ในฟอสเฟตบัพเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

MIL-53(Al) NPX		NH ₂ -MIL-53(Al) NPX		PAC NPX	
time (min)	qt	time (min)	qt	time (min)	qt
0.5	17.80	0.5	0	0.5	5.13
1	20.54	1	0	1	5.67
3	25.28	3	0	3	7.17
5	33.13	5	0	5	9.21
7	41.78	7	0	7	11.97
10	45.68	10	0	10	13.85
15	55.72	15	0	15	16.96
20	56.21	20	0	20	19.79
25	58.50	25	0	25	19.76
30	59.66	30	0	30	20.37
45	63.98	45	0	45	26.93
60	65.67	60	0	60	29.40
75	65.75	75	0	75	30.83
90	67.45	90	0	90	31.60
120	68.56	120	0	120	36.94
180	69.99	180	0	180	35.67
240	68.98	240	0	240	37.68
300	66.62	300	0	300	38.72
360	65.35	360	0	360	40.35

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับไอบูโพรเฟนของ MIL-53(Al), NH₂-MIL-53(Al), และ PAC ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

MIL-53(Al) IBP		NH ₂ -MIL-53(Al) IBP		PAC IBP	
time (min)	qt	time (min)	qt	time (min)	qt
0.5	5.84	0.5	0	0.5	3.34
1	20.24	1	0	1	4.70
3	31.64	3	0	3	7.74
5	38.51	5	0	5	8.96
7	42.76	7	0	7	10.47
10	47.72	10	0	10	12.39
15	50.72	15	0	15	14.78
20	55.79	20	0	20	16.22
25	62.06	25	0	25	17.99
30	62.56	30	0	30	18.92
40	54.60	45	0	45	24.26
45	71.04	60	0	60	28.26
50	64.62	75	0	75	29.10
60	69.96	90	0	90	33.17
75	71.10	120	0	120	33.22
90	71.80	180	0	180	33.54
120	73.98	240	0	300	35.28
180	73.64	300	0	360	35.90
240	70.54	360	0		
300	76.28				
360	67.69				



ภาคผนวก ค

ข้อมูลไอโซโทมการดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. ไอโซเทอมการดูดซับ

ตาราง ค-1 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(A) ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

KET			NPX			IBP		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.09	0.61	4.72	0.77	0.30	4.59	1.00	0.30	3.91
3.01	1.35	15.83	2.26	0.63	16.20	2.45	0.60	21.19
5.15	3.08	30.50	2.79	0.98	18.16	3.45	0.78	26.44
7.50	4.51	41.23	4.67	1.54	30.43	5.711	1.63	39.82
10.29	5.75	50.26	6.49	2.24	41.58	11.24	3.52	75.11
12.30	7.17	56.30	8.52	2.79	55.22	12.95	4.88	87.60

ตาราง ค-2 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(A) ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

KET			NPX			IBP		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.97	1.06	0	0.80	0.88	0	0.86	0.99	0
2.68	2.98	0	2.62	3.38	0	2.67	3.00	0
4.41	4.74	0	4.31	4.54	0	4.65	5.32	0
6.30	6.92	0	5.60	4.96	0	7.36	6.62	0
9.13	10.24	0	8.44	9.04	0	9.51	10.47	0
11.42	12.89	0	10.90	10.04	0	12.08	11.63	0

ตาราง ค-3 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

KET			NPX			IBP		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.10	0.76	3.36	0.65	0.14	5.10	1.11	0.32	7.50
3.04	2.24	7.91	1.97	0.99	9.65	2.93	1.70	12.58
5.04	3.62	12.33	3.44	1.88	15.46	6.01	3.60	20.66
7.10	5.82	18.14	5.19	2.78	23.87	8.28	6.16	24.10
10.50	8.22	25.45	8.28	5.30	28.93	13.08	8.84	38.87
13.14	11.53	27.45	10.29	6.80	33.59	14.32	10.04	43.19

2. การดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำเสียสังเคราะห์

ตาราง ค-4 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบยاملสารผสมโดย MIL-53(AI) ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

KET			NPX			IBP		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.89	0.30	2.07	1.31	0.20	2.39	1.69	-	-
1.17	0.96	5.97	1.67	1.43	11.10	2.52	1.08	11.67
2.11	1.20	8.69	4.03	1.98	19.71	5.70	2.19	34.74
3.06	1.81	11.63	6.35	3.29	28.68	8.44	3.64	45.01
4.27	2.84	13.12	8.81	5.12	33.89	11.61	6.11	50.52
5.23	3.72	13.50	10.84	6.80	36.22	14.76	8.66	54.62

ตาราง ค-5 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน ในน้ำเสีย
สังเคราะห์แบบยาลสารผสมโดย $\text{NH}_2\text{-MIL-53(Al)}$ ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน
0.01 โมลาร์

KET			NPX			IBP		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.98	1.00	0	1.16	1.36	0	0.43	-	-
2.54	2.69	0	4.40	5.10	0	1.40	0.86	0
2.32	2.40	0	4.12	4.61	0	0.81	1.39	0
3.48	3.46	0	7.08	7.16	0	0.96	0.93	0
5.32	5.45	0	8.73	9.26	0	9.20	9.38	0
6.42	6.60	0	8.30	8.88	0	10.66	10.78	0

ตาราง ค-6 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟน ในน้ำเสีย
สังเคราะห์แบบยาลสารผสมโดย PAC ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความแรงไอออน
0.01 โมลาร์

KET			NPX			IBP		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.84	0.59	0.32	2.17	1.74	0.40	1.40	1.57	0.92
1.13	0.92	0.43	3.94	3.46	4.22	3.55	3.12	1.64
2.14	1.91	2.08	6.29	5.64	4.30	5.50	5.41	1.98
3.01	2.74	2.17	8.42	8.36	4.56	8.25	8.04	2.67
4.23	4.19	2.44	10.84	10.82	6.36	11.78	12.05	4.25
5.06	5.03	2.64				14.30	14.78	4.41

3. การดูดซับร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารเดี่ยว

ตาราง ค-7 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(A)

KET			DOM		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.94	0.25	6.88	5.36	5.45	0
2.70	0.75	19.42	5.35	5.59	0
4.46	1.49	29.29	5.40	5.52	0
6.36	2.23	38.31	5.35	5.57	0
9.24	3.39	54.67	5.37	5.47	0
11.49	4.85	62.07	5.32	5.60	0

ตาราง ค-8 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

NPX			DOM		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.97	0.37	5.99	4.99	5.12	0
2.94	0.90	20.12	5.06	4.96	0
5.12	1.35	37.14	4.94	5.09	0
6.80	1.76	49.95	4.92	5.10	0
9.36	2.93	62.03	4.91	5.23	0
11.77	4.00	75.16	4.90	5.00	0

ตาราง ค-9 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

IBP			DOM		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.89	0.039	9.32	4.81	5.04	0
2.34	0.30	20.37	4.97	5.33	0
3.81	0.94	28.18	4.82	5.52	0
5.37	1.49	37.34	4.74	5.50	0
7.132	2.33	46.54	4.96	5.05	0
8.27	3.48	59.63	4.95	5.17	0

ตาราง ค-10 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย
แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AI)

KET			DOM		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.32	1.02	2.64	3.82	3.82	0
3.08	2.46	5.41	3.97	4.11	0
5.38	3.50	11.43	3.93	3.96	0
7.84	6.49	13.12	4.00	4.00	0
10.82	9.41	17.29	3.95	3.99	0
13.90	11.95	18.42	4.03	4.12	0

ตาราง ค-11 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย
แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AI)

NPX			DOM		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
2.51	1.82	6.61	4.14	4.20	0
4.52	3.28	9.07	3.91	4.18	0
7.77	6.81	11.05	4.01	4.20	0
11.22	9.09	16.92	3.99	4.04	0
15.39	12.55	25.42	4.02	4.04	0

ตาราง ค-12 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AI)

IBP			DOM		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.74	1.38	3.00	4.04	4.06	0
3.21	2.68	4.62	3.88	4.28	0
4.73	4.11	5.26	3.93	4.08	0
6.31	5.44	7.89	3.97	4.11	0
7.67	6.42	11.42	4.02	4.05	0

ตาราง ค-13 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

KET			DOM		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
0.96	0.76	1.89	5.31	5.35	0
2.88	2.27	5.87	5.33	5.39	0
4.61	3.53	8.70	5.28	5.37	0
6.57	4.96	13.99	5.26	5.35	0
9.54	7.46	18.37	5.34	5.46	0
11.46	9.45	19.34	5.29	5.30	0

ตาราง ค-14 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย
แบบยวมลสารเดี่ยวโดย PAC

NPX			DOM		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.30	1.05	0.42	5.18	5.28	0
3.48	3.16	2.52	4.59	5.28	0
5.56	5.14	3.11	4.57	5.28	0
8.28	7.62	4.17	4.61	5.33	0
10.92	10.28	6.16	5.04	5.33	0
13.99	13.95	6.62	4.61	5.54	0

ตาราง ค-15 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย
แบบยวมลสารเดี่ยวโดย PAC

IBP			DOM		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.90	0.42	3.06	4.62	5.09	0
2.12	1.62	3.80	4.59	4.95	0
3.45	3.14	4.74	4.58	5.28	0
4.74	3.97	5.00	4.67	5.09	0
6.88	6.17	5.45	4.72	5.23	0
6.73	6.48	7.63	4.61	5.10	0

4. การดูดซับร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยาลสารผสม

ตาราง ค-16 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยาลสารผสมโดย MIL-53(AI)

KET			NPX			IBP			WW		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.91	0.52	3.72	0.82	0.31	4.91	4.25	0.99	26.64	5.12	4.96	0
4.35	1.53	27.05	2.38	0.78	15.22	4.69	1.97	31.11	4.52	5.03	0
5.47	2.03	32.66	4.58	1.56	28.81	8.37	3.75	43.77	4.50	4.65	0
7.98	3.48	34.20	6.66	2.62	37.76	9.75	5.01	44.06	4.66	4.72	0
10.62	6.95	44.51	9.15	5.17	39.33				4.51	4.62	0
13.94	10.20	55.03	10.41	6.16	40.03				4.53	4.62	0

ตาราง ค-17 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซนและไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยาลสารผสมโดย NH₂-MIL-53(AI)

KET			NPX			IBP			WW		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
2.13	1.89	2.13	2.24	1.99	2.22	1.17	1.98	1.32	5.16	6.40	0
4.27	3.92	3.45	3.99	3.64	3.44	2.08	3.57	3.84	3.62	4.51	0
6.23	5.56	6.08	6.01	5.36	6.03	5.05	4.75	4.75	3.56	4.29	0
9.33	8.47	7.58	8.90	8.06	7.48	7.31	5.39	5.39	3.57	4.22	0
12.58	11.66	7.78	12.36	11.43	7.98	9.04	10.80	7.80	3.64	3.96	0

ตาราง ค-18 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสียแบบยاملสารผสมโดย PAC

KET			NPX			IBP			WW		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.33	1.08	0.58	0.82	0.72	0.40	0.68	0.72	0	3.53	4.60	0
4.33	3.21	1.53	3.20	2.98	0.52	2.49	2.34	0	3.46	5.21	0
5.28	4.72	1.84	4.54	4.18	1.02	3.11	3.34	0	3.49	4.60	0
7.12	6.92	2.42	6.23	5.65	2.15	4.92	4.76	0	3.51	4.66	0
10.42	10.26	5.38	8.73	8.69	3.48	8.42	8.79	0	3.66	4.59	0
12.46	12.40	10.84	10.81	10.75	5.48	10.06	10.21	0	3.50	4.65	0

5. การดูดซับร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำแบบยاملสารเดี่ยว

ตาราง ค-19 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC

MIL-53(AI)			NH ₂ -MIL-53(AI)			PAC		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.84	1.82	0	1.44	1.40	0	1.80	1.81	0
3.56	3.44	0	2.60	2.61	0	3.46	3.58	0
5.27	5.50	0	3.95	3.67	0	5.27	5.36	0
7.49	7.52	0	4.84	4.98	0	6.89	7.00	0
9.69	9.87	0	6.30	6.50	0	9.62	9.69	0
1.84	1.82	0						

ตาราง ค-20 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

KET			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
2.53	0.33	19.97	5.46	5.77	0
4.03	0.99	28.74	5.55	5.81	0
5.82	2.19	33.76	5.62	5.83	0
7.58	3.41	40.26	5.43	5.79	0
9.88	4.76	46.90	5.52	5.82	0

ตาราง ค-21 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

NPX			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.85	0.39	4.67	4.80	4.82	0
1.89	0.56	13.17	4.56	4.62	0
3.03	1.30	18.87	4.51	4.84	0
4.17	1.60	25.39	4.54	5.04	0
5.54	1.86	36.63	4.62	4.93	0
7.14	2.66	43.78	4.63	4.64	0

ตาราง ค-22 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

IBP			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
4.61	1.22	33.62	5.31	5.66	0
6.60	2.30	41.16	5.32	5.51	0
9.42	3.46	58.05	5.24	5.47	0
11.65	5.10	62.97	5.40	5.40	0

ตาราง ค-23 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AI)

KET			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.91	0.52	3.28	5.56	5.64	0
2.24	1.84	5.40	5.46	5.70	0
4.20	3.66	8.63	5.55	5.69	0
6.01	5.59	10.77	5.42	5.53	0
7.72	7.38	14.85	5.41	5.66	0

ตาราง ค-24 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย $\text{NH}_2\text{-MIL-53(A)}$

NPX			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.90	0.78	1.18	5.85	5.83	0
1.88	1.58	2.88	5.85	5.91	0
3.31	2.51	7.60	5.84	5.97	0
4.34	3.41	8.81	5.90	5.83	0
5.61	4.07	15.72	5.90	5.92	0

ตาราง ค-25 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย $\text{NH}_2\text{-MIL-53(A)}$

IBP			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.36	0.98	3.88	5.40	5.32	0
3.16	2.58	6.14	5.24	5.27	0
5.64	4.47	11.30	5.41	5.28	0
7.99	6.29	15.79	5.18	5.35	0
9.66	7.96	16.48	5.35	5.21	0
13.02	11.22	17.53	5.64	5.59	0

ตาราง ค-26 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

KET			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.88	0.85	0.37	5.56	5.74	0
2.56	2.34	2.18	5.52	5.63	0
4.15	3.90	2.32	5.43	5.69	0
5.94	5.40	5.28	5.56	5.64	0
7.99	6.96	9.33	5.47	5.64	0
10.20	8.74	12.24	5.53	5.68	0

ตาราง ค-27 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

NPX			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.07	1.00	0.67	4.22	4.70	0
2.85	2.43	0.81	4.59	4.65	0
5.43	5.14	2.89	4.56	4.60	0
7.23	7.15	4.19	4.56	4.71	0
9.92	8.82	7.48	4.59	4.61	0
13.05	12.28	10.50	4.64	4.67	0

ตาราง ค-28 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดไม่ชอบน้ำแบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

IBP			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.10	1.04	0.62	5.24	5.49	0
2.84	2.52	3.15	5.25	5.38	0
4.65	4.24	4.00	5.35	5.51	0
7.02	6.32	6.50	5.42	5.39	0
10.17	9.13	10.26	5.41	5.37	0
12.84	11.65	11.69	5.74	5.44	0

6. การดูดซับร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำแบบยاملสารผสม

ตาราง ค-29 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำแบบยاملสารผสม โดย MIL-53(AI)

KET			NPX			IBP			HPO		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
3.27	0.16	29.24	3.02	0.09	27.53	4.43	0.96	26.24	7.08	7.20	0
6.07	2.17	38.04	5.36	1.32	39.46	6.10	2.04	33.95	7.00	7.31	0
8.05	3.37	43.90	7.33	2.205	47.92	7.39	3.25	38.09	6.94	7.12	0
10.78	5.18	45.81	8.97	3.10	48.13	8.01	5.16	39.34	6.95	6.90	0
13.26	8.30	53.41	9.76	4.56	56.06				6.84	7.12	0

ตาราง ค-30 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำแบบยามลสารผสมโดย NH₂-MIL-53(AI)

KET			NPX			IBP			HPO		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.10	0.84	0.95	0.83	0.79	0.50	1.37	1.14	0.19	4.70	4.66	0
2.5	2.48	2.14	3.33	2.95	4.01	3.67	2.70	2.54	5.07	5.11	0
4.23	4.02	2.88	5.76	5.31	4.70	5.49	4.71	8.10	4.97	5.10	0
7.37	6.95	4.15	7.02	6.54	5.29	14.49	7.74	10.31	4.91	5.01	0
11.43	11.01	4.52	10.88	10.06	8.12	7.72	11.26	15.47	4.87	4.94	0

ตาราง ค-31 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟน ร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดไม่ชอบน้ำแบบยามลสารผสมโดย PAC

KET			NPX			IBP			HPO		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
0.84	0.58	2.50	0.87	0.45	3.10	1.05	0.77	0.60	6.81	7.30	0
3.17	2.65	4.96	3.00	1.70	8.28	2.37	2.23	1.31	6.88	7.38	0
5.92	5.12	5.12	5.33	3.51	10.44	4.24	3.90	1.36	6.84	7.24	0
8.26	6.85	7.87	8.12	4.92	20.72	6.70	6.00	2.81	7.32	7.27	0
10.37	9.50	7.96	8.81	8.38	24.15	7.99	7.92	3.30	6.88	7.18	0
14.04	13.48	13.78	10.41	12.56	26.20	8.62	8.48	6.83	6.88	7.39	0

7. การดูดซับร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำแบบยاملสารเดี่ยว

ตาราง ค-32 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำโดย MIL-53(AI), NH₂-MIL-53(AI), และ PAC

MIL-53(AI)			NH ₂ -MIL-53(AI)			PAC		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
0.93	1.27	0	1.87	1.91	0	1.17	0.72	4.43
2.01	3.03	0	3.38	3.48	0	3.14	2.03	10.98
4.20	4.83	0	4.93	5.21	0	5.37	4.03	13.34
6.56	7.20	0	6.82	6.90	0	7.43	5.80	15.72
5.99	10.64	0	8.77	9.05	0	11.32	8.83	23.56
12.38	14.66	0				10.61	9.42	11.12

ตาราง ค-33 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำแบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

KET			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
130	0.59	6.60	4.96	4.78	0
3.05	1.50	15.10	4.87	4.82	0
5.38	2.15	30.56	4.76	4.79	0
7.25	3.06	39.19	4.89	4.85	0
10.71	5.09	53.33	4.68	4.77	0
12.14	5.69	58.95	4.86	4.79	0

ตาราง ค-34 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

NPX			HPI		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.77	0.46	3.16	4.50	4.44	0
2.28	1.28	9.78	4.86	5.03	0
3.95	1.84	20.70	5.36	5.31	0
6.06	2.67	33.73	5.05	5.06	0
8.75	4.50	42.29	4.83	5.04	0
11.44	5.64	56.47	5.02	5.17	0

ตาราง ค-35 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย MIL-53(AI)

IBP			HPI		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
2.12	0.79	13.14	4.86	4.64	0
4.71	1.93	26.37	4.78	4.70	0
6.61	3.45	30.14	4.161	5.22	0
10.29	5.90	41.07	4.40	4.82	0
11.57	6.53	47.38	5.04	5.03	0

ตาราง ค-36 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AU)

KET			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
0.87	0.94	0	4.88	5.20	0
2.71	2.76	0	4.94	5.13	0
4.38	4.55	0	4.94	5.08	0
6.51	9.80	0	5.04	4.95	0
9.44	9.27	0	5.03	4.73	0

ตาราง ค-37 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AU)

NPX			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
0.74	0.90	0	5.02	5.09	0
2.67	2.94	0	4.86	5.20	0
4.71	5.14	0	4.89	5.23	0
6.58	7.28	0	4.86	5.18	0
8.95	9.72	0	4.87	5.21	0

ตาราง ค-38 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย NH₂-MIL-53(AU)

IBP			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.27	1.16	0	4.87	5.20	0
3.26	3.42	0	4.96	5.10	0
5.53	8.63	0	4.81	5.33	0
7.62	5.79	0	4.94	5.26	0
10.56	11.13	0	4.84	5.25	0

ตาราง ค-39 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

KET			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.08	0.68	3.88	5.19	4.28	9.02
2.84	2.14	6.45	5.25	4.60	6.07
5.02	3.77	10.93	5.23	4.63	5.28
7.41	5.47	17.44	5.20	4.61	5.33
10.06	7.81	20.50	5.24	4.75	4.53
12.75	10.23	22.96	5.21	4.60	5.60

ตาราง ค-40 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของนาพรอกเซนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

NPX			HPI		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
0.81	0.48	3.31	4.87	4.46	4.05
2.54	1.78	7.57	4.73	4.48	3.59
4.48	3.57	8.78	4.74	4.60	2.41
6.68	5.38	12.43	4.80	4.58	2.51
9.05	7.45	14.67	4.77	4.59	2.28
11.64	10.04	15.52	4.78	4.58	2.05

ตาราง ค-41 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายชนิดชอบน้ำ
แบบยاملสารเดี่ยวโดย PAC

IBP			HPI		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.22	0.89	3.26	4.94	3.53	14.14
3.18	2.59	3.55	4.86	3.64	11.76
5.31	4.94	3.58	4.77	3.92	8.32
7.73	7.36	5.69	4.75	4.18	5.53
10.85	10.17	6.00	4.89	3.84	9.52
13.18	12.37	7.48	4.88	3.84	9.59

8. การดูดซับร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำแบบยामลสารผสม

ตาราง ค-42 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับ

KET			NPX			IBP			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.14	0.49	6.47	0.75	0.19	5.51	1.10	n.d.	n.d.	3.03	3.52	0
3.04	1.59	14.24	2.31	0.94	13.43	2.54	1.02	14.92	3.08	3.03	0
4.81	2.39	23.16	4.20	1.62	24.69	4.51	1.76	26.31	3.08	3.31	0
7.92	4.46	33.40	7.06	3.10	38.30	6.57	2.95	34.97	3.04	3.14	0
12.18	7.89	41.42	10.10	5.28	46.44	9.65	5.25	42.49	3.06	3.04	0
16.72	12.75	38.13	13.48	8.68	46.10	14.06	9.49	43.95	3.11	3.24	0

สารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำแบบยामลสารผสมโดย MIL-53(AI)

ตาราง ค-43 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำแบบยामลสารผสมโดย NH₂-MIL-53(AI)

KET			NPX			IBP			HPI		
C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
1.09	1.12	0	0.82	0.90	0	0.71	1.18	0	5.13	5.18	0
3.18	3.23	0	2.78	2.95	0	3.66	3.77	0	5.17	5.15	0
5.27	5.14	0	5.31	5.36	0	6.39	6.48	0	5.33	5.12	0
7.25	7.38	0	7.54	7.99	0	8.84	9.21	0	5.07	5.24	0
10.98	10.96	0	11.50	11.59	0	13.52	13.52	0	5.06	5.23	0

ตาราง ค-44 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของคีโตโพรเฟน นาพรอกเซน และไอบูโพรเฟนร่วมกับสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำแบบผสมสารผสม โดย PAC

KET			NPX			IBP			HPI		
C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1.17	0.79	3.66	0.77	0.45	3.10	0.82	0.81	0.15	3.09	1.52	7.75
3.23	2.38	7.99	2.59	1.71	8.28	3.09	2.79	2.82	3.07	1.57	6.80
5.75	4.59	10.97	4.60	3.51	10.44	5.12	4.67	4.31	3.13	1.66	6.07
8.62	6.19	18.79	7.34	4.92	20.72	6.79	5.42	6.56	3.18	1.48	9.22
12.22	10.07	20.20	10.91	8.38	24.15	9.85	8.95	8.53	3.14	1.73	5.12
16.96	15.07	23.40	15.00	12.56	26.20	13.12	12.46	13.30	3.12	1.83	3.61





บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาษาไทย

เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทป์ ปิยะมั่งคลา. 2555. จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน. KKU Science Journal 40: 1285-1300.

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์. 2555. ผลของกลุ่มสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำดิบจากลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาต่อโอกาสการก่อตัวของสารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีนในน้ำประปา. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ณัฐพร เอี่ยมสะอาด. 2557. การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 และการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ดัดแปรพื้นผิว. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ต่อศักดิ์ นวลนิล. 2560. การกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนโตรล์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำการติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บรมพจน์ พฤตวินาสันต์ และ ลีณา สุนทรสุข. 2558. บทความเผยแพร่ความรู้สู่ประชาชน อันตรายจากยาตกค้างในสิ่งแวดล้อม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/390/> [2560 ธันวาคม 27].

พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์. 2556. มลพิษทางน้ำ กับ Emerging Pollutants ตอน Endocrine Disrupted Compounds (EDCs) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/book56_4/sanitation.html [2560 ธันวาคม 27].

มันสิน ตันกุลเวศม์. 2538. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มารุต สุขสมจิตร และ ไตรเทพ วิชัยโกวิทเทน. 2559. คุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำจากอาหารกุ้งและปุยคอกโดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3: 423-431.

- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2558. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วาติกา เศวตโยธิน, ชัชชัย โทปัญญา, สุดา อิทธิสุภรณ์รัตน์, และ ชญานิน น้ำเยื้อง. 2559. การปนเปื้อนของสารกลุ่มผลิตภัณฑ์ยาและผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพในแม่น้ำบางปะกง. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- วีรวัฒน์ หาญอมรรุ่งเรือง. 2557. การดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อมชนิดมีประจุ โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิวโดยเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในแอลจินเนตชนิดเม็ดโดยระบบคอลัมน์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรัณย์ จิตตวนิชประภา. 2554. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Ciprofloxacin ด้วยถ่านที่เตรียมจากกากกาแฟ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สุภกิจ จิวเจริญ, อัจฉราพร ขาโสภา, จำลอง อรุณเลิศอารีย์ และ จารุวรรณ วงศ์ทะเนตร. ความผันแปรของสารอินทรีย์ละลายน้ำและคุณสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำท่าจีน. ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมนครสวรรค์ ครั้งที่ 8. หน้า 23-33. 26 กรกฎาคม 2555 ณ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิษณุโลก, 2555
- อธิป เหลืองไพโรจน์, 2551. การใช้ UF/MF ในการบำบัดเบื้องต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการ RO ในการบำบัดน้ำเสียและน้ำทะเล เปรียบเทียบพลังงานต้นทุนที่ใช้ในการบำบัด. ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อภัย ราษฎร์วิจิตร. 2557. เอ็นเสด ยาเอ็นเสด (NSAID หรือ NSAIDs) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://haamor.com/th/> [2561 มกราคม 2].
- อภิพงษ์ พุฒคำ. 2556. การประยุกต์ใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์. KKU Res. J. 18: 161-177.

ภาษาอังกฤษ

- Aksamitowska, S.Z., Bartczak, P., Zembrzuska, J., and Jesionowski, T. 2018. Removal of hazardous non-steroidal anti-inflammatory drugs from aqueous solutions by biosorbent based on chitin and lignin. Science of the Total Environment 612: 1223–1233.
- Bagheri, H., Afkhamib, A., and Noroozic, A. 2016. Removal of Pharmaceutical Compounds from Hospital Wastewaters Using Nanomaterials: A Review. Analytical and bioanalytical chemistry research 3: 1-18.
- Baker, A. 2002. Fluorescence properties of some farm wastes: implications for water quality monitoring. Water Res. 36: 189-195.
- Beurroies, I., et al. 2010. Using pressure to provoke the structural transition of metal-organic frameworks. Angew. Chem. Int. Ed. 49: 7526–7529.
- Bhadra, B. N., Ahmed, I., Kim, S., and Jhung, S. H. 2017. Adsorptive removal of ibuprofen and diclofenac from water using metal organic framework-derived porous carbon. Chemical Engineering Journal 314: 50–58.
- Bolong, N., Ismaila, A.F., Salimb, M.R., and Matsuurad, T. 2009. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. Desalination 239: 229–246.
- Bosca, F., Miranda, M.A., Va, L., and Vargas, F., 1990. New photodegradation pathways for naproxen, a phototoxic non-steroidal anti-inflammatory drug. J. Photochem. Photobiol 5: 131–134.
- Brozinski, J.M., Lahti, M., Meierjohann, A., Oikari, A., and Kronberg, L. 2012. The Anti-Inflammatory Drugs Diclofenac, Naproxen and Ibuprofen are found in the Bile of Wild Fish Caught Downstream of a Wastewater Treatment Plant. Environmental Science & Technology 47: 342–348.

- Busar, H. R. , Poiger, T. , and Müller, M. D. 1998 Occurrence and fate of the pharmaceutical drug diclofenac in surface waters: rapid photodegradation in a lake. Environment Science Technology 32: 3449–3556.
- Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J.A., and Booksh, K. 2003. Fluorescence Excitation-Emission Matrix Regional Integration to Quantify Spectra for Dissolved Organic Matter. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 37: 5701-5710.
- Chen, X.F., et al. 2012. Metal–organic framework MIL-53(Al) as a solid-phase microextraction adsorbent for the determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in water samples by gas chromatography–tandem mass spectrometry. Analyst 137: 5411–5419.
- Cheng, X., et al. 2013. Size- and morphology-controlled NH₂-MIL-53(Al) prepared in DMF–water mixed solvents. Dalton Trans. 42: 13698-13705.
- Cheng, X., et al. 2015. Size -controlled silver nanoparticles stabilized on thiol-functionalized MIL-53(Al) frameworks. Nanoscale 7: 9738–9745.
- Chong, M.N., et al. 2010. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. Water Research 44: 2997-3027.
- Cleuvers, M. 2004. Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid. Ecotoxicol. Environ. Saf. 59: 309–315.
- Coimbra, R.N., Calisto, V., Ferreira, C.I.A., Esteves, V.I., and Otero, M. 2015. Removal of pharmaceuticals from municipal wastewater by adsorption onto pyrolyzed pulp mill. sludge. Arabian Journal of Chemistry 10: 895–904.
- Diniz, M.S., et al. 2015. Ecotoxicity of ketoprofen, diclofenac, atenolol and their photolysis byproducts in zebrafish (*Danio rerio*). Science of the Total Environment 505: 282–289.

- Ensano, B.M.B., Borea, L., Naddeo, V., Belgiorno, V., Luna, M.D.G., and Ballesteros Jr, F. C. 2017. Removal of Pharmaceuticals from Wastewater by Intermittent Electrocoagulation. water 9: 85-100.
- Evgenidou, E.N., Konstantinou, I.K., and Lambropoulou, D.A. 2015. Occurrence and removal of transformation products of PPCPs and illicit drugs in wastewaters: A review. Science of the Total Environment 505: 905–926.
- Feng, L., Hullebusch, E.D.V., Rodrigo, M.A., Esposito, G., and Oturan, M.A. 2013. Removal of residual anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals from aqueous systems by electrochemical advanced oxidation processes. A review. Chemical Engineering Journal 228: 944–964.
- Gagnon, C., and Lajeunesse, A. 2008. Persistence and fate of highly soluble pharmaceutical products in various types of municipal wastewater treatment plants. WIT Transactions on Ecology and the Environment 109: 799-807.
- Giovine, R., et al. 2016. NMR crystallography to probe the breathing effect of the MIL-53(Al) metal–organic framework using solid-state NMR measurements of ^{13}C – ^{27}Al distances. Acta Cryst C73: 176–183.
- Grassi, M., Kaykioglu, G., Belgiorno, V., and Lofrano, G. 2012. Removal of Emerging Contaminants from Water and Wastewater by Adsorption Process. Emerging Compounds Removal from Wastewater 18: 15-37.
- Gu, Y., et al. 2017. Size Modulation of Zirconium-Based Metal Organic Frameworks for Highly Efficient Phosphate Remediation. ACS Appl. Mater. Interfaces 9: 32151–32160.
- Han, S., et al. 2010. Endocrine disruption and consequences of chronic exposure to ibuprofen in Japanese medaka (*Oryzias latipes*) and freshwater cladocerans *Daphnia magna* and *Moina macrocopa*. Aquatic Toxicology 98: 256–264.

- Hasan, Z., and Jung, S.H. 2015. Removal of hazardous organics from water using metal-organic frameworks (MOFs) : Plausible mechanisms for selective adsorptions. Journal of Hazardous Materials 283: 329–339.
- Hasan, Z., Choi, E.J., and Jung, S.H. 2013. Adsorption of naproxen and clofibric acid over a metal–organic framework MIL-101 functionalized with acidic and basic groups. Chemical Engineering Journal 219: 537–544.
- Hasan, Z., Khan, N.A., and Jung, S.H. 2016. Adsorptive removal of diclofenac sodium from water with Zr-based metal–organic frameworks. Chemical Engineering Journal 284: 1406–1413.
- Heberer, T. 2002. Tracking persistence pharmaceuticals residues from municipal sewage to drinking water. J Hydrol 266: 175–189.
- Heckmann, L.H., et al. 2007. Chronic toxicity of ibuprofen to *Daphnia magna*: Effects on life history traits and population dynamics. Toxicology Letters 172: 137–145.
- Hudson, N., Baker, A., and Reynolds, D. 2007. Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters: A review. River Res. Appl. 23: 631–649.
- Ji, K., et al. 2013. Effects of non-steroidal anti-inflammatory drugs on hormones and genes of the hypothalamic-pituitary-gonad axis, and reproduction of zebrafish. Journal of Hazardous Materials 254– 255: 242– 251.
- Jiang, J.Q., Zhou, Z., and Sharma, V.K. 2013. Occurrence, transportation, monitoring and treatment of emerging micro-pollutants in waste water — A review from global views. Microchemical Journal 110: 292–300.
- Jitsupa Suthkota. 2015. Removal of ciprofloxacin and carbamazepine by graphene oxide bi-functional group mesoporous silica. (Doctoral dissertation), Hazardous Substance and Environmental Management (Interdisciplinary Program) Graduate School Chulalongkorn University.

- Jutima Permrunguang. 2013. Effects of surface functional groups and natural organic matter on clofibric acid adsorption by mesoporous silicate SBA-15. (Master's Thesis), Environmental Management (Interdisciplinary Program) Graduate School Chulalongkorn University.
- Kalyva, M. 2017. Fate of pharmaceuticals in the environment -A review-. Sweden: Department of Ecology and Environmental Science (EMG) Umeå university.
- Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R.M., and Guwy, A.J. 2009. The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. Water Res 43: 363–80.
- Khan, N.A., Hasan, Z., and Jhung, S.H. 2013. Adsorptive removal of hazardous materials using metal-organic frameworks (MOFs): A review. Journal of Hazardous Materials 244–245: 444–456.
- Kim, J.W., et al. 2009. Occurrence of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in surface water from Mankyung River, South Korea. J Health Sci 55: 249–258.
- Kim, S.D., Cho, J., Kim, I.S., Vanderford, B.J., and Snyder, S.A. 2007. Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters. Water Res 41: 1013–1021.
- Kleywegt, S., Pileggi, V., Yang, P., Hao, C., Zhao, X., and Rocks, C., 2011. Pharmaceuticals, hormones and bisphenol A in untreated source and finished drinking water in Ontario, Canada—occurrence and treatment efficiency. Sci Total Environ 409: 1481–1488.
- Kumar, P., Bansal, V., Kim, K.H., and Kwond, E.E. 2018. Metal-organic frameworks (MOFs) as futuristic options for wastewater treatment. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 62: 130–145.

- Li, C., Xiong, Z., Zhang, J., and Wu, C. 2015. The Strengthening Role of the Amino Group in Metal–Organic Framework MIL-53 (Al) for Methylene Blue and Malachite Green Dye Adsorption. J. Chem. Eng. Data 60: 3414–3422.
- Li, J., et al. 2014. Characteristics of arsenate removal from water by metal-organic frameworks (MOFs). Water Science & Technology 70: 1391-1397.
- Li, S., Zhang, X., and Huang, Y. 2017. Zeolitic imidazolate framework-8 derived nanoporous carbon as an effective and recyclable adsorbent for removal of ciprofloxacin antibiotics from water. Journal of Hazardous Materials 321: 711–719.
- Li, Y., Jindal, R., Choi, K., Kho, Y.L. and Bullen, P.G. 2012. Pharmaceutical Residues in Wastewater Treatment Plants and Surface Waters in Bangkok. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste 1: 88-91.
- Li, Z., Wu, Y.N., Li, J., Zhang, Y., Zou, X., and Li, F. 2015. The Metal–Organic Framework MIL-53(Al) Constructed from Multiple Metal Sources: Alumina, Aluminum Hydroxide, and Boehmite. Chemistry a European 21: 6913 – 6920.
- Lin, A.Y.C., and Tsai, Y.T. 2009. Occurrence of pharmaceuticals in Taiwan's surface waters: Impact of waste streams from hospitals and pharmaceutical production facilities. Science of the Total Environment 407: 3793–3802.
- Lin, A.Y.C., Tsai, Y.T., Yu, T.H., Wang, X.H., and Lin, C.F. 2011. Occurrence and fate of pharmaceuticals and personal care products in Taiwan's aquatic environment. Desalin Water Treat 32: 57–64.
- Lin, K.Y.A., Chen, S.Y., and Jochems, A.P. 2015. Zirconium-based metal organic frameworks: Highly selective adsorbents for removal of phosphate from water and urine. Materials Chemistry and Physics 160: 168-176.

- Lin, S., Zhao, Y., and Yu, Y.S. 2018. Highly Effective Removal of Nonsteroidal Anti-inflammatory Pharmaceuticals from Water by Zr(IV)-Based Metal–Organic Framework: Adsorption Performance and Mechanisms. ACS Appl. Mater. Interfaces 10: 28076–28085.
- Liu, J., et al. 2013. Environmentally friendly synthesis of highly hydrophobic and stable MIL-53 MOF nanomaterials. Chem. Commun. 49: 7430-7432.
- Liu, R., et al. 2019 Effective and selective adsorption of phosphate from aqueous solution via T trivalent-metals-based amino-MIL-101 MOFs. Chemical Engineering Journal 357: 159–168.
- Llewellyn, P. L., et al. 2008. Different Adsorption Behaviors of Methane and Carbon Dioxide in the Isotypic Nanoporous Metal Terephthalates MIL-53 and MIL-47. J. Am. Chem. Soc. 130: 12808–12814.
- Loiseau, T., et al. 2004. A Rationale for the Large Breathing of the Porous Aluminum Terephthalate (MIL-53) Upon Hydration. Chem. Eur. J. 10: 1373-1382.
- Loiseau, T., Volkringer, C., Haouas, M., Taulelle, F., and Ferey, G. 2015. Crystal chemistry of aluminium carboxylates: From molecular species towards porous infinite three-dimensional networks Comptes Rendus Chimie 18: 1350–1369.
- Lonappana, L., et al. 2016. Diclofenac in municipal wastewater treatment plant: quantification using laser diode thermal desorption—atmospheric pressure chemical ionization—tandem mass spectrometry approach in comparison with an established liquid chromatography-electrospray ionization—tandem mass spectrometry method. Journal of Chromatography A 1433: 106–113.
- Luo, Y., et al. 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. Science of the Total Environment 473–474: 619–641.

- Maoz, A., and Chefetz, B. 2010. Sorption of the pharmaceuticals carbamazepine and naproxen to dissolved organic matter: Role of structural fractions. Water research 44: 981–989.
- Matamoros, V., and Salvadó, V. 2013. Evaluation of a coagulation/ flocculation-lamellar clarifier and filtration-UV-chlorination reactor for removing emerging contaminants at full-scale wastewater treatment plants in Spain. Journal Environmental Management 117: 96–102.
- Millange, F., Serre, C., Guillou, N., Ferey, G., and Walton, R.I. et al. 2008. Structural Effects of Solvents on the Breathing of Metal–Organic Frameworks: An In Situ Diffraction Study. Angew. Chem. Int. Ed. 47: 4100 –4105.
- Mishra, P., Uppara, H.P., Mandal, B., and Gumma S. 2014. Adsorption and Separation of Carbon Dioxide Using MIL-53(Al) Metal-Organic Framework. Industrial & Engineering Chemistry Research 53: 19747–19753.
- Mompelat, S., Bot, B.L., and Thomas, O. 2008. Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water. Environment International 35: 803–814.
- Monteiro, S. C. , and Boxall, A. B. A. 2010. Occurrence and Fate of Human Pharmaceuticals in the Environment. Environmental Contamination and Toxicology 8: 54-154.
- Mostofa, K.M.G., Honda, Y. and Sakugawa, H. 2005. Dynamics and optical nature of fluorescent dissolved organic matter in river waters in Hiroshima Prefecture, Japan. Geo. J. 39: 257-271.
- Mounfield, W.P., and Walton, K.S. 2012. Synthesis of Large-Pore Stabilized MIL-53(Al) Compounds with Increased CO₂ Adsorption and Decreased Water Adsorption. Journal of Materials Chemistry 00: 1-3.
- Mounfield, W.P., and Walton, K.S. 2015. Effect of synthesis solvent on the breathing behavior of MIL-53(Al). Journal of Colloid and Interface Science 447: 33–39.

- Musikavong, C., Wattanachira, S., Nakajima, F., and Furumai, H. 2007. Three dimensional fluorescent spectroscopy analysis for the evaluation of organic matter removal from industrial estate wastewater by stabilization ponds. Water science and Technology 55: 201-210.
- Oliveira, T.S., Murphy, M., Mendola, N., Wong, V., Carlson, D., and Waring, L. 2015. Characterization of Pharmaceuticals and Personal Care products in hospital effluent and waste water influent/effluent by direct-injection LC-MS-MS. Science of the Total Environment 518–519: 459–478.
- Pal, A., Gin, K.Y.H., Lin, A.Y.C., and Reinhard, M. 2010. Impacts of emerging organic contaminants on fresh- water resources: review of recent occurrences, sources, fate and effects. Sci Total Environ 408: 6062–6069.
- Papageorgiou, M., Kosma, C., and Lambropoulou, D. 2016. Seasonal occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of 55 pharmaceuticals and personal care products in a municipal wastewater treatment plant in Central Greece. Science of the Total Environment 543: 547–569.
- Patel, M., et al. 2019. Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods. Chemical Reviews 119: 3510–3673.
- Patil, D.V., Rallapalli, P.B.S., Dangi, G.P., Tayade, R.J., Somani, R.S., and Bajaj, H.C. 2011. MIL-53(AU): An Efficient Adsorbent for the Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solutions. Industrial & Engineering Chemistry Research 50: 10516–10524.
- Peng, X., Yu, Y., Tang, C., Tan, J., Huang, Q., and Wang, Z., 2008. Occurrence of steroid estrogens, endocrine-disrupting phenols, and acid pharmaceutical residues in urban riverine water of the Pearl River Delta, South China. Sci Total Environ 397: 158–66.

- Petrie, B., Barden, R., and Hordern, B.K. 2015. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. water research 72: 3-27.
- Peuravuori, J., Lehtonen, T., and Pihlaja, K. 2002. Sorption of aquatic humic matter by DAX-8 and XAD-8 resins comparative study using pyrolysis gas chromatography. Analytical Chimica Acta 23: 219-226.
- Pounds, N., Hutchinson, T.H., Maclean, S., Webley, M., and Pascoe, D. 2008. Acute and chronic effects of ibuprofen in the freshwater mollusc *Planorbis carinatus* (Gastropoda: Planorbidae). Ecotoxicol. Environ. Safety submitted for publication.
- Qian, X., et al. 2013. Structure stability of metal-organic framework MIL-53 (Al) in aqueous solutions. Hydrogen Energy 38: 16710-16715.
- Quinn, B., Schmidt, W., O'Rourke, K., and Hernan, R. 2011. Effects of the pharmaceuticals gemfibrozil and diclofenac on biomarker expression in the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) and their comparison with standardized toxicity tests. Chemosphere 84: 657-663.
- Rallapalli, P., Patil, D., Prasanth, K.P., Somani, R.S., Jasra, R.V., and Bajaj, H.C. 2010. An alternative activation method for the enhancement of methane storage capacity of nanoporous aluminium terephthalate, MIL-53(Al). J Porous Mater 17: 523-528.
- Rosal, R., et al. 2010. Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation. Water research 44: 578-588.
- Ruiz, S.H., Wickramasekara, S., Abrell, L., Gao, X., Chefetz, B., and Chorover, J. 2013. Complexation of trace organic contaminants with fractionated dissolved organic matter Implications for mass spectrometric quantification. Chemosphere 91: 344-350.

- Sánchez-Sánchez, M.S., Getachew, N., Díaz, K., Díaz-García, M., Chebudeb, Y., and Díaz, I. 2015. Synthesis of metal–organic frameworks in water at room temperature: salts as linker sources. Green Chem. 17: 1500-1509.
- Sánchez-Sánchez, M.S., Getachew, N., Díaz, K., Díaz-García, M., Chebudeb, Y., and Díaz, I. 2015. Synthesis of metal–organic frameworks in water at room temperature: salts as linker sources. Green Chem 17: 1500–1509.
- Santos, L.H.M.L.M., et al. 2013. Contribution of hospital effluents to the load of pharmaceuticals in urban wastewaters: Identification of ecologically relevant pharmaceuticals. Science of the Total Environment 461–462: 302–316.
- Seo, P.W., Bhadra, B.N., Ahmed, I., Khan, N.A., and Jung, S.H. 2016. Adsorptive Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products from Water with Functionalized Metal-organic Frameworks: Remarkable Adsorbents with Hydrogen bonding Abilities. Scientific Reports 6: 34462-34473.
- Shon, H.K., Vigneswaran, S., and Snyder, S.A. 2007. EFFLUENT ORGANIC MATTER (EFOM) IN WASTEWATER: CONSTITUENTS, EFFECTS AND TREATMENT. Nevada: Department of Research and Development, Southern Nevada Water.
- Spongberg, A.L., et al. 2011. Reconnaissance of selected PPCP compounds in Costa Rican surface waters. Water Res 45: 6709–6717.
- Stancová, V., Ziková, A., Svobodová, Z., and Kloas, W. 2015. Effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAID) naproxen on gene expression of antioxidant enzymes in zebrafish (*Danio rerio*). Environmental Toxicology and Pharmacology 40: 343–348.
- Stasinakis, A.S., Mermigka, S., Samaras, V.G., Farmak, E., and Thomaidis, N.S. 2012. Occurrence of endocrine disruptors and selected pharmaceuticals in Aisonas River (Greece) and environmental risk assessment using hazard indexes. Environ Sci Pollut Res 19: 1574–1583.

- Stavitski, E., et al. 2011. Complexity behind CO₂ Capture on NH₂-MIL-53(Al). Langmuir 27: 3970–3976.
- Suárez, S., Lema, J.M., and Omil, F. 2009. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. Bioresource Technology 100: 2138–2146.
- Sui, Q., Huang, J., Deng, S., Yu, G., and Fan, Q. 2010. Occurrence and removal of pharmaceuticals, caffeine and DEET in wastewater treatment plants of Beijing, China. Water research 44: 417–426.
- Suksaroj. C., Rattanamnee, P., Musikavong, C., and Wattanachira, S. 2009. The determination of tryptophan and humic and fulvic acid like substances reduction in raw water from U-TAPAO Basin Thailand with alum coagulation. Water Practice and Technology 4: 1751-1760.
- Tewari, S., Jindal, R., Kho, Y.L., Eoc, S., and Choi, K. 2013. Major pharmaceutical residues in wastewater treatment plants and receiving waters in Bangkok, Thailand, and associated ecological risks. Chemosphere 91: 697–704.
- Thommes, M. 2010. Physical Adsorption Characterization of Nanoporous Materials. Chemie Ingenieur Technik 82: 1059-1073.
- Tien, C. 1994. Adsorption calculations and modeling. Boston: Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering.
- Tiwari, B., Sellamuthu, B., Ouarda, Y., Drogui, P., Tyagi, R.D., and Buelna, G. 2017. Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. Bioresource Technology 224: 1–12.
- Tiwari, D., Lalhriatpuia, C., and Lee, S.M. 2015. Hybrid materials in the removal of diclofenac sodium from aqueous solutions: Batch and column studies. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 30: 167–173.
- Tixier, C., Singer, H.P., Oellers, S., and Muller, S.R. 2003. Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and

- Naproxen in Surface Waters. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 37: 1061-1068.
- Torrellas, S.Á., Rodríguez, A., Ovejero, G., Gómez, J.M., and García, J. 2015. Removal of caffeine from pharmaceutical wastewater by adsorption: influence of NOM, textural and chemical properties of the adsorbent. Environmental Technology 37: 1618–1630.
- Tran, N.H., Urase, T., and Ta, T.T. 2014. A Preliminary Study on the Occurrence of Pharmaceutically Active Compounds in Hospital Wastewater and Surface Water in Hanoi, Vietnam. Clean–Soil, Air, Water 42: 267–275.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2005. PHARMACEUTICALS AND PERSONAL CARE PRODUCTS (PPCP'S) AS ENVIRONMENTAL POLLUTANTS: POLLUTION FROM PERSONAL ACTIONS [Online] . Available from: Agency <https://cfpub.epa.gov/si/>
- Utrilla, J.R., Polo, M.S., García, M.Á.F, Joya, G.P., and Pérez, R.O. 2013. Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. Chemosphere 93: 1268–1287.
- Verlicchi, P., Aukidy, M.A., and Zambello, E. 2012. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—a review. Science Total Environment 429: 123–155.
- Verlicchi, P., Aukidy, M.A., Galletti, A., Petrovic, M., and Barceló, D. 2012. Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment. Science of the Total Environment 430: 109–118.
- Vulliet, E., Olivé, C.C., and Loustalot, G.M.F. 2011. Occurrence of pharmaceuticals and hormones in drinking water treated from surface waters. Environ Chem Lett 9: 103–114.

- Wang, C., et al. 2011. Investigation of pharmaceuticals in Missouri natural and drinking water using high performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry. Water Res 45: 1818–1828.
- Wang, J., Zhao, S., Zhang, M., and He, B. 2018. Targeted eco-pharmacovigilance for ketoprofen in the environment: Need, strategy and challenge. Chemosphere 194: 450-462.
- Wang, X., Shi, X., Zhou, X., Qiu, X., and Lu, W. 2018. Adsorption Behavior of Metal-organic Framework NH₂-MIL-53(AI) for Diclofenac Sodium in Aqueous Solution. Chemical Journal of Chinese Universities 39: 206-211.
- Wang, Y., Yanga, Q., Dong, J., and Huang, H. 2018. Competitive adsorption of PPCP and humic substances by carbon nanotube membranes: Effects of coagulation and PPCP properties. Science of the Total Environment 619–620: 352–359.
- Westerhoff, P., Yoon, Y., Snyder, S., and Wert, E. 2005. Fate of Endocrine-Disruptor, Pharmaceutical, and Personal Care Product Chemicals during Simulated Drinking Water Treatment Processes. Environmental Science & Technology 39: 6649-6663.
- Won, J.S., Ji, W.L., and Jeong, E.O. 2010. Occurrence and fate of pharmaceuticals in wastewater treatment plants and rivers in Korea. Environmental Pollution 158: 1938–1947.
- Won, J.S., Ji, W.L., Eung, S.L., Sun, K.S., Seung, R.H., and Jeong, E.O. 2011. Occurrence and distribution of pharmaceuticals in wastewater from households, livestock farms, hospitals and pharmaceutical manufactures. Chemosphere 82: 179–186.
- Wuersch, T.A., Alencastro, L.F.D., Grandjean, D., and Tarradellas, J. 2005. Occurrence of several acidic drugs in sewage treatment plants in Switzerland and risk assessment. Water Research 39: 761–1772.

- Yan, J., Jiang, S., Ji, S., Shi, D., and Cheng, H. 2014. Metal-organic framework MIL-53(Al): synthesis, catalytic performance for the Friedel-Crafts acylation, and reaction mechanism. Science China Chemistry 10: 1544–1552.
- Yot, P. G., et al. 2016. Mechanical energy storage performance of an aluminum fumarate metal-organic framework. Chem. Sci. 7: 446– 450.
- Zhao, W., Wang, B., Wang, Y., Deng, S., Huang, J., and Yu, G. 2017. Deriving acute and chronic predicted no effect concentrations of pharmaceuticals and personal care products based on species sensitivity distributions. Ecotoxicology and Environmental Safety 144: 537–542.
- Zhou, H.C., Long, J.R., and Yaghi, O.M. 2012. Introduction to metal-organic frameworks. Chem. Rev. 112: 673– 1268.
- Zhou, M., et al. 2013. The removal of bisphenol A from aqueous solutions by MIL-53(Al) and mesostructured MIL-53(Al). Journal of Colloid and Interface Science 405: 157–163.
- Zhuo, N. et al. 2017. Adsorption of three selected pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) onto MIL-101(Cr)/ natural polymer composite beads. Separation and Purification Technology 177: 272–280.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวดี ฉันทนาวารกุลชัย
วัน เดือน ปี เกิด	27 กุมภาพันธ์ 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)
ที่อยู่ปัจจุบัน	37/2 ซอยฉิมน้อย ถนนโยธาธิการ-นนทบุรี อำเภอเมืองนนทบุรี ตำบลบางกร่าง จังหวัดนนทบุรี 11000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY