

การกำจัดสารประกอบเปอร์ฟลูออรีเนทและความชุ่มชื้นในน้ำเสียสังเคราะห์โดย  
อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก



นางสาวพิชามณูษ์ พัชรชนม์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

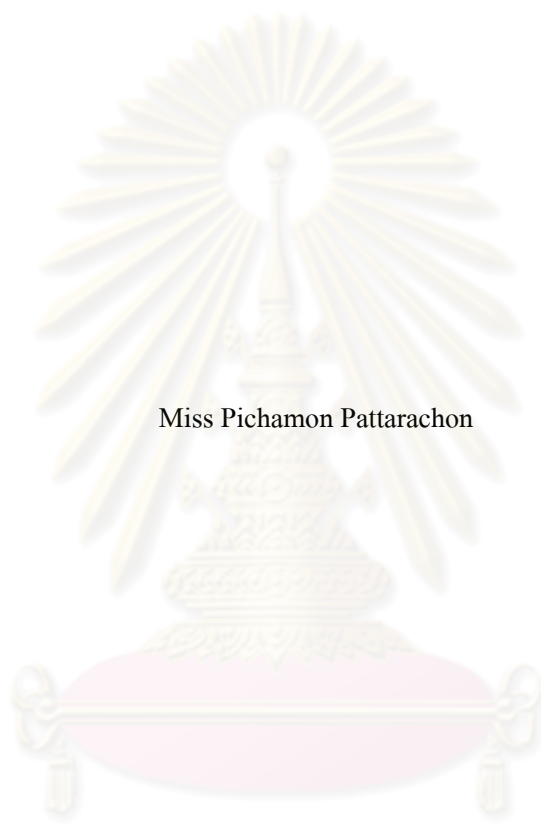
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF PERFLUORINATED COMPOUNDS AND TURBIDITY FROM  
SYNTHETIC WASTEWATER BY SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES



Miss Pichamon Pattarachon

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทและความชุ่มใน  
น้ำเสียสังเคราะห์โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

โดย

นางสาว พิชามณัฐ พัฒรชนม์

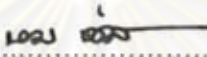
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

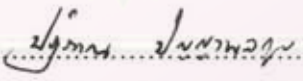
อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

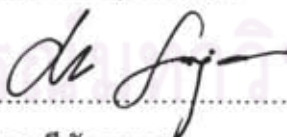
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ชัชชิตา ศรีอัญญาพร)

พิชามณูษ์ พัฒรชนม์ : การกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนทและความขุ่นในน้ำเสีย  
สังเคราะห์โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก. (Removal of Perfluorinated  
Compounds and Turbidity from Synthetic Wastewater by Superparamagnetic Particles)  
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 172 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนท (PFCs) สองชนิด  
คือ กรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก (PFOA) และสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนท (PFOS) ซึ่ง  
เป็นสารเคมีตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม (POPs) ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก  
เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์-  
พาราแมกเนติก และปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบซิลิกา (SCP) และต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์  
3 ชนิดคือ 3-aminopropyltriethoxy-, 3-mercaptopropyl และ n-octyldimethyl บนพื้นผิวของ SCP  
จากการศึกษาพบว่า PFOA ถูกดูดซับได้น้อยกว่า PFOS ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ และ  
โครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่กว่า ทำให้ถูกดูดซับได้ง่ายกว่า PFOA โดย PAC มีประสิทธิภาพในการ  
ดูดซับ PFCs ทั้งสองชนิดสูงสุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงและมีหมู่ฟังก์ชันหลากหลายชนิด และจาก  
การทดลองพบว่า PFCs ถูกดูดซับได้ดีบนพื้นผิวแบบชอบน้ำมากกว่าพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ โดย  
พันธะไฮโดรเจนและแรงทางประจุสามารถส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับ PFOA บนพื้นผิวแบบ  
ชอบน้ำได้ ส่วนการดูดซับบนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำมีแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลัก นอกจากนี้  
พบว่า SCP สามารถแยกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กได้ดีที่พีเอช 2 (99.49 %) ส่วน SCP ที่ต่อติด  
หมู่ 3-mercaptopropyl (M-SCP) สามารถแยกออกจากน้ำได้ดีในช่วงพีเอช 2-7 (>99.30 %) โดยที่  
สมบัติความไม่ชอบน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำได้ง่าย และพบว่า  
การดูดซับ PFOS มีผลต่อประจุบนพื้นผิว และทำให้ขนาดของแรงแม่เหล็กที่เข้าไปดึงดูดแกนกลาง  
แมกเนไทต์ของอนุภาคลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคลดลง

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....      ลายมือชื่อนิสิต..... พิชามณูษ์ พัฒรชนม์.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....      ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา...2551.....



## 5070591421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / PERFLUORINATED COMPOUNDS / SURFACE  
FUNCTIONAL GROUP / SURFACTANT / SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES

PICHAMON PATTARACHON : REMOVAL OF PERFLUORINATED  
COMPOUNDS AND TURBIDITY FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY  
SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES. ADVISOR :  
PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 172 pp.

Adsorption efficiencies of perfluorinated compounds (PFCs), persistence organic pollutants (POPs), on superparamagnetic particles was investigated, comparing with powder activated carbon (PAC). superparamagnetic particle was synthesized and modified surface by silica coating (SCP) and organic functional groups grafting. 3-aminopropyltriethoxy-, 3-mercaptopropyl and n-octyldimethyl functional groups were grafted on SCP surface. Two types of PFCs i.e., perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) was applied in this study. The results showed that PFOS can be adsorbed higher than PFOA due to lower solubility and larger molecular size. PAC had highest affinity for both PFOS and PFOA, caused by high surface area and functional groups complexity. Hydrophilic adsorbents had higher adsorption capacities comparing with hydrophobic adsorbents. Hydrogen bonding and electrostatic interaction could enhance adsorption capacity of PFOA on hydrophilic adsorbents. However, van der Waals interaction was the major attractive force for hydrophobic adsorbents. SCP had highest separation efficiency at pH 2 (99.49 %) under magnetic field. But M-SCP showed higher separated efficiency at the pH from 2 to 7 (>99.3 %) due to hydrophobic property. But PFOS adsorbed on SCPs surfaces could decrease separation efficiency, because PFOS could change the surface charge and reduced effect of the magnetic field on superparamagnetic core of the particles.

Department : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Student's Signature *S. Pichamon Pattarachon*

Field of Study : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Advisor's Signature *P. Patiparn Punyapalakul*

Academic Year : 2008

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้แนวทาง คำปรึกษา และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ และ ดร. ชัชลิดา ศรีอภัยพร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต และขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเรื่องข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ทุก ๆ คน ที่อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษา จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท.....	5
2.2 กระบวนการบำบัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท.....	10
2.3 กระบวนการดูดซับ.....	10
2.4 อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	21
2.5 ถ่านกัมมันต์.....	25
2.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	26
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	38
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	61
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	61

	หน้า
4.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ของอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	69
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่ มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	77
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ และการศึกษา จลนพลศาสตร์ของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	117
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์...	151
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวกลางดูดซับ.....	164
ภาคผนวก ง หลักการวิเคราะห์โดยเครื่อง TOC.....	167
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	172



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่	2.1 ชนิดและข้อมูลทั่วไปของกลุ่มสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท.....	6
ตารางที่	2.2 สมบัติพื้นฐานของสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนท.....	8
ตารางที่	2.3 สมบัติพื้นฐานของกรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก.....	9
ตารางที่	2.4 หมู่ฟังก์ชันที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ตัวกลางคูดซับ.....	29
ตารางที่	3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของตัวกลางคูดซับ	45
ตารางที่	3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การคูดซับสารประกอบ เพอร์ฟลูออรีเนท ของตัวกลางคูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	49
ตารางที่	3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการคูดซับสารประกอบ เพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	51
ตารางที่	3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการคูดซับ สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก แต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	52
ตารางที่	3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มี สมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก.....	53
ตารางที่	3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มี สมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก.....	54
ตารางที่	3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กเมื่อมีสาร PFOS	56
ตารางที่	3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของ น้ำเสียสังเคราะห์.....	57
ตารางที่	3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคความขุ่นต่อประสิทธิภาพ การตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์.....	58

ตารางที่ 3.10	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความ ขุ่นน้ำเสียสังเคราะห์ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	59
ตารางที่ 3.11	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการใช้อุณหภูมิที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียที่มีสาร PFOS.....	60
ตารางที่ 4.1	ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของของตัวกลางดูดซับอนุภาค ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	69
ตารางที่ 4.2	ค่าคงที่ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสาร PFOS ของตัวกลาง ดูดซับที่มีสมบัติสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ ชนิดผง.....	74
ตารางที่ 4.3	ค่าคงที่ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสาร PFOA ของตัวกลาง ดูดซับที่มีสมบัติสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ ชนิดผง.....	74
ตารางที่ 4.4	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	85
ตารางที่ 4.5	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	86
ตารางที่ 4.6	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ SCP.....	97
ตารางที่ 4.7	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP.....	98
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยแรงแม่เหล็ก และกรณี ที่ไม่ใช่แรงแม่เหล็กของ SCP และ M-SCP.....	98
ตารางที่ 4.9	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ SCP.....	101
ตารางที่ 4.10	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ M-SCP.....	102
ตารางที่ 4.11	ปริมาณของสาร PFOS ต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของ SCP.....	103
ตารางที่ 4.12	ปริมาณของสาร PFOS ต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของ M-SCP.....	103
ตารางที่ 4.13	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี ความขุ่น 100 NTU.....	104
ตารางที่ 4.14	ประสิทธิภาพการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความขุ่นต่างๆ.....	104
ตารางที่ 4.15	ประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ SCP ในน้ำเสีย สังเคราะห์.....	105

ตารางที่	4.16 ประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP ในน้ำเสีย สังเคราะห์.....	106
ตารางที่	4.17 ประสิทธิภาพการใช้อุณหภูมิที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัด ความขุ่นจากน้ำเสียที่มีสาร PFOS.....	107
ตารางที่	ก.1 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 7.....	121
ตารางที่	ก.2 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 7.....	122
ตารางที่	ก.3 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 7.....	123
ตารางที่	ก.4 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 7.....	124
ตารางที่	ก.5 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 7.....	125
ตารางที่	ก.6 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 7.....	126
ตารางที่	ก.7 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 7.....	127
ตารางที่	ก.8 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 7.....	128
ตารางที่	ก.9 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 7.....	129
ตารางที่	ก.10 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 7.....	130
ตารางที่	ก.11 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 5.....	136
ตารางที่	ก.12 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 5.....	136
ตารางที่	ก.13 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 7.....	137
ตารางที่	ก.14 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 7.....	137
ตารางที่	ก.15 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 9.....	138
ตารางที่	ก.16 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 9.....	138
ตารางที่	ก.17 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 5.....	139
ตารางที่	ก.18 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 5.....	139
ตารางที่	ก.19 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 7.....	140
ตารางที่	ก.20 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 7.....	140
ตารางที่	ก.21 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 9.....	141
ตารางที่	ก.22 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 9.....	141
ตารางที่	ก.23 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 5.....	142
ตารางที่	ก.24 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 5.....	142
ตารางที่	ก.25 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 7.....	143

ตารางที่	ก.26 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 7.....	143
ตารางที่	ก.27 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 9.....	144
ตารางที่	ก.28 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 9.....	144
ตารางที่	ก.29 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 5.....	145
ตารางที่	ก.30 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 5....	145
ตารางที่	ก.31 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 7....	146
ตารางที่	ก.32 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 7....	146
ตารางที่	ก.33 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 9....	147
ตารางที่	ก.34 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 9....	147
ตารางที่	ก.35 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 5.....	148
ตารางที่	ก.36 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 5.....	148
ตารางที่	ก.37 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 7.....	149
ตารางที่	ก.38 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 7.....	149
ตารางที่	ก.39 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 9.....	150
ตารางที่	ก.40 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 9.....	150
ตารางที่	ข.1 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ SCP.....	152
ตารางที่	ข.2 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP.....	153
ตารางที่	ข.3 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนกรณีที่ไม่ใช้แรงแม่เหล็กในการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	155
ตารางที่	ข.4 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ SCP.....	155
ตารางที่	ข.5 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ M-SCP...	156
ตารางที่	ข.6 ข้อมูลการทดสอบผลของปริมาณของ PFOS ต่อความสามารถในการตกตะกอนของ SCP.....	157
ตารางที่	ข.7 ข้อมูลการทดสอบผลของปริมาณของ PFOS ต่อความสามารถในการตกตะกอนของ M-SCP.....	158
ตารางที่	ข.8 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่น 100 NTU ที่พีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร.....	158

ตารางที่	ข.9 ข้อมูลการทดสอบผลของปริมาณความขุ่นต่อความสามารถในการ ตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร.....	160
ตารางที่	ข.10 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ SCP 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU.....	160
ตารางที่	ข.11 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU.....	162
ตารางที่	ข.12 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ออกซิเจนที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมก- เนติกในการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ที่มีความขุ่น 400 NTU และมีสาร PFOS 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	163
ตารางที่	ค.1 ข้อมูลการทดสอบปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิว.....	165
ตารางที่	ค.2 ข้อมูลการหาค่าประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	166
ตารางที่	ค.3 ข้อมูลการหาค่าประจุบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	166



## สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลคาร์บอกซิเลท และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลซัลโฟเนท.....	5
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ.....	14
รูปที่ 2.3	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	16
รูปที่ 2.4	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช.....	17
รูปที่ 2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	22
รูปที่ 2.6	ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	26
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	38
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	40
รูปที่ 3.3	แผนภาพขั้นตอนการเตรียมอนุภาคขนาดนาโนที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	40
รูปที่ 3.4	แผนภาพขั้นตอนการป้องกันการรวมตัวของอนุภาคแมกเนไทต์.....	41
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	42
รูปที่ 3.6	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่ซิลานอล).....	42
รูปที่ 3.7	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่อะมิโน).....	43
รูปที่ 3.8	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่เมอร์แคปโต).....	44
รูปที่ 3.9	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก(หมู่อัลคิล).....	45
รูปที่ 4.1	ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	62
รูปที่ 4.2	FT-IR spectra ของตัวกลางดูดซับ SCP.....	63
รูปที่ 4.3	FT-IR spectra ของตัวกลางดูดซับ A-SCP.....	64

รูปที่ 4.4	FT-IR spectra ของตัวกลางดูดซับ M-SCP.....	64
รูปที่ 4.5	FT-IR spectra ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP.....	65
รูปที่ 4.6	หมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	66
รูปที่ 4.7	ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์บนตัวกลางดูดซับ M-SCP และ A-SCP.....	67
รูปที่ 4.8	ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	67
รูปที่ 4.9	จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ SCP.....	70
รูปที่ 4.10	จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ A-SCP.....	70
รูปที่ 4.11	จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ M-SCP.....	71
รูปที่ 4.12	จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ OD-SCP.....	71
รูปที่ 4.13	จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ PAC.....	72
รูปที่ 4.14	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ของการดูดซับสาร PFOS โดยใช้ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	76
รูปที่ 4.15	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ของการดูดซับสาร PFOA โดยใช้ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	76
รูปที่ 4.16	ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS พีเอช 5.....	78
รูปที่ 4.17	ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวแบบชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของ PFOS และ PFOA บนตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	79
รูปที่ 4.18	ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS พีเอช 7.....	80
รูปที่ 4.19	ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS พีเอช 9.....	81
รูปที่ 4.20	ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOA พีเอช 5.....	82
รูปที่ 4.21	ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOA พีเอช 7.....	82

รูปที่ 4.22	ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOA พีเอช 9.....	83
รูปที่ 4.23	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ SCP....	87
รูปที่ 4.24	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ A-SCP.....	88
รูปที่ 4.25	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ M-SCP.....	89
รูปที่ 4.26	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP.....	90
รูปที่ 4.27	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ PAC.....	91
รูปที่ 4.28	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ SCP....	92
รูปที่ 4.29	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ A-SCP.....	93
รูปที่ 4.30	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ M-SCP.....	94
รูปที่ 4.31	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP.....	95
รูปที่ 4.32	ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ PAC.....	96
รูปที่ 4.33	อนุภาคมีประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลมในสนามแม่เหล็ก.....	99
รูปที่ 4.34	อนุภาคมีประจุเคลื่อนที่เป็นเกลียวในสนามแม่เหล็ก เมื่อความเร็วของประจุ ทำมุมใดๆ กับสนามแม่เหล็ก.....	100
รูปที่ ก.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ และ $t$ สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม	118
รูปที่ ก.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $t/q_t$ และ $t$ สำหรับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม.....	120
รูปที่ ก.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ และ $1/C_e$ สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ แลงเมียร์.....	132
รูปที่ ก.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log X/M$ และ $\log C_e$ สำหรับไอโซเทอร์มการ ดูดซับแบบแลงเมียร์.....	134
รูปที่ ค.1	กราฟมาตรฐานไนโตรเจน.....	165

	หน้า
รูปที่ ง.1 เครื่อง TOC VcpH.....	168
รูปที่ ง.2 กราฟมาตรฐาน TC.....	169
รูปที่ ง.3 กราฟมาตรฐาน IC.....	170
รูปที่ ง.4 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PFOS ต่อปริมาณ TOC.....	170
รูปที่ ง.5 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PFOA ต่อปริมาณ TOC....	171



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารเคมีพวกกลุ่มสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต (Perfluorinated Compounds; PFCs) ถูกผลิตและใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มานานกว่า 50 ปี สารกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัว ทั้งทางฟิสิกส์และเคมี โดยเฉพาะการมีเสถียรภาพต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ทำให้สารกลุ่มนี้ ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น เป็นสารลดแรงตึงผิว สารกึ่งตัวนำ สารหล่อลื่น สารดับเพลิง ยาฆ่าแมลง การเคลือบผิวบรรจุภัณฑ์อาหารและรูปถ่าย เป็นต้น (Tseng, 2006) ในขณะที่ขบวนการที่สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตมีความคงตัวสูง ทนต่อการออกซิไดซ์ ในธรรมชาติ และย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก ทำให้สารกลุ่มนี้ถูกจัดเป็นสารที่ตกค้างยาวนาน ในสิ่งแวดล้อม สะสมในสิ่งมีชีวิต และมีความเป็นพิษ (Houde และคณะ, 2006; Lau และคณะ, 2007) โดยสารกลุ่มนี้ถูกพบแพร่กระจายไปทั่วโลกทั้งในมนุษย์ สัตว์ แม่น้ำ ดินตะกอน รวมทั้งระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป

กรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก (Perfluorooctanoic acid; PFOA) และสาร เพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (Perfluorooctane sulfonate: PFOS) เป็นกลุ่มสารประกอบ เพอร์ฟลูออรีเนตสองตัวสำคัญที่พบมาก และยังเป็นสารผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการย่อยสลาย สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตตัวอื่นอีกด้วย (Ellis และคณะ, 2004; Dinglasan และคณะ, 2004; Dimitrov และคณะ, 2004) ด้วยองค์ประกอบที่มีสายโครงสร้างที่แข็งแรงของฟลูออรีนอยู่ใน โมเลกุลทำให้สารกลุ่มนี้ย่อยสลายในธรรมชาติหรือกระบวนการทางชีวภาพได้ยาก ซึ่งด้วยเหตุผล ดังกล่าวระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทั่วไปจึงไม่สามารถย่อยสลายสารกลุ่มนี้ได้ นอกจากนี้ กระบวนการทางเคมี-ฟิสิกส์ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ริเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน โฟโตไลซิส ยังมีข้อจำกัดด้านสภาพการทำงาน ความต้องการพลังงาน ราคา และประสิทธิภาพที่ได้ ทำให้กระบวนการดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยทั่วไป ต้องการ พลังงานน้อย และมีประสิทธิภาพสูง น่าจะเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการช่วยแยกสารนี้ออก จากน้ำได้ดี

เนื่องจากกรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก และสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนตมี สมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) และสายพันธะคาร์บอนกับฟลูออรีนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) การเลือกใช้ ตัวกลางดูดซับอนุภาคนาโนของแมกเนไทต์ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และเพิ่มการ



ต่อติดหมูฟังก์ชันที่มีประจุบวกและความชอบน้ำสูงที่ผิวของอนุภาคน่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี นอกจากนี้สมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกของอนุภาคยังเป็นลักษณะเฉพาะที่สามารถช่วยในการแยกอนุภาคออกจากน้ำได้ง่าย โดยใช้แรงดึงดูดของสนามแม่เหล็ก รวมถึงมีความสามารถในการช่วยรวมอนุภาคอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำให้เกิดการตกตะกอนด้วยแรงแม่เหล็กได้อีกด้วย

งานวิจัยชิ้นนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการนำอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกเป็นตัวกลางดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตสองชนิดคือ กรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก และสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต โดยมีการปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางดูดซับด้วยการต่อติดหมูฟังก์ชันแต่ละชนิดบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ โดยทำการศึกษาไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์ และผลของพีเอชต่อการดูดซับบนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง และศึกษาประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต พร้อมทั้งกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต ด้วยอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมูฟังก์ชันอะมิโน หมูเมอร์แคปโต และหมู่อัลคิล เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง
2. ศึกษาผลของหมูฟังก์ชันบนพื้นผิวและพีเอช ต่อการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ด้วยแรงแม่เหล็ก
4. ศึกษาประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต พร้อมทั้งกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สถานที่ดำเนินการวิจัย
  - ทำการสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต ด้วยวิธีการหาปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำ (Total Organic Carbon; TOC) ด้วยเครื่อง TOC Analyzer ณ ห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย

## 2. การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

ทำการการสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ชนิดแมกเนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 60 นาโนเมตร ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกโดยการเคลือบด้วยซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชันที่ผิว ได้แก่ หมู่อะมิโน หมู่เมอร์แคปโต และหมู่อัลคิล

## 3. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ และผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตสองชนิดคือ กรดเพอร์ฟลูออโรออกทานอิก (PFOA) และสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (PFOS) จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการทดลองแบบทีละเท (Batch) โดยใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

## 4. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ทำการศึกษาผลของพีเอช ปริมาณอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และการดูดซับสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำเสียของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่นจากดินขาว (Kaolin) ด้วยการทดลองแบบทีละเท

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพและผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันอะมิโน หมู่เมอร์แคปโต และหมู่อัลคิล บนพื้นผิวต่อการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

2. ทราบถึงผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทบนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก
3. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ในการกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ร่วมกับการกำจัดความขุ่น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

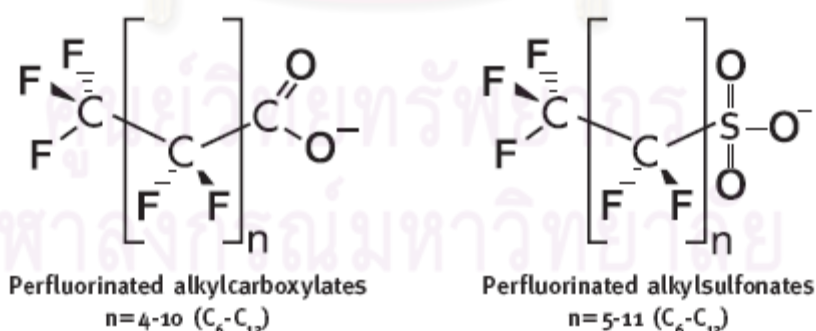
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

##### 2.1.1 ลักษณะสมบัติของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทเป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเหมือนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั่วไป แต่จะมีอะตอมของฟลูออรีนแทนที่อะตอมไฮโดรเจนที่มากเกาะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับฟลูออรีนเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทมีเสถียรภาพมากกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั่วไปมาก สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่สำคัญมีสองกลุ่มหลักคือ สารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนทอัลคิลคาร์บอกซิเลท (Perfluorinated alkylcarboxylates; PFCA) และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนทอัลคิลซัลโฟเนท (Perfluorinated alkylsulfonates; PFAS) ซึ่งมีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว โดยประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) คือหมู่ฟังก์ชันพวกซัลโฟเนทหรือคาร์บอกซิล และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) คือส่วนของสายคาร์บอนที่จับกับฟลูออรีน ซึ่งการที่ยังมีสายโครงสร้างของคาร์บอนกับฟลูออรีนที่ยาวจะยิ่งเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น โครงสร้างของสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลคาร์บอกซิเลท และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลซัลโฟเนท ดังรูปที่ 2.1 ชนิดและข้อมูลทั่วไปของกลุ่มสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลคาร์บอกซิเลท และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลซัลโฟเนท

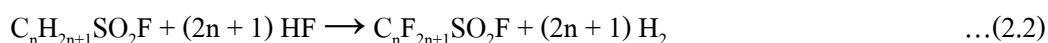
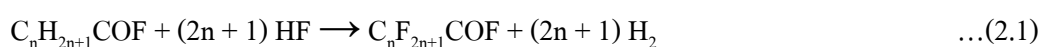
ที่มา: Lange และคณะ, 2006

ตารางที่ 2.1 ชนิดและข้อมูลทั่วไปของกลุ่มสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท (Yong, 2007)

ชื่อย่อ	ชื่อเต็ม	สูตรโครงสร้าง	น้ำหนัก โมเลกุล	CAS No.
PFBA	Perfluorobutyric Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> COOH	214.0	375-22-4
PFPeA	Perfluoropentanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> COOH	264.1	2706-90-3
PFHxA	Perfluorohexanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> COOH	314.1	307-24-4
PFHpA	Perfluoroheptanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> COOH	364.1	375-85-9
PFOA	Perfluorooctane Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COOH	414.1	335-67-1
PFNA	Perfluorononanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH	464.1	375-95-1
PFDA	Perfluorodecanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	514.1	335-76-2
PFUnA	Perfluoroundecanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> COOH	564.1	2058-94-8
PFDoA	Perfluorododecanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	614.1	307-55-1
PFTeDA	Perfluorotetradecanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	714.1	376-06-7
PFHxDA	Perfluorohexadecanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	814.1	67905-19-5
PFOcDA	Perfluorooctadecanoic Acid	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	914.1	16517-11-6
PFBuS	Perfluorobutane Sulfonate	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> K	338.2	29420-49-3
PFHxS	Perfluorohexane Sulfonate	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> SO <sub>3</sub> K	438.2	3871-99-6
PFOS	Perfluorooctane Sulfonate	CF <sub>3</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> SO <sub>3</sub> K	538.2	2795-39-3

สารกลุ่มนี้เป็นสารลดแรงตึงผิวที่สามารถนำไปใช้งานได้ทุกสภาวะ โดยสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลคาร์บอกซิเลท และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลซัลโฟเนท ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ใช้เคลือบผิวบรรจุภัณฑ์ เครื่องหนัง หรือสิ่งทอเพื่อกันคราบสกปรกหรือน้ำมัน และใช้เป็นสารดับเพลิง เป็นต้น

กระบวนการผลิตสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลคาร์บอกซิเลท และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลซัลโฟเนท ที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปคือกระบวนการเทโลเมอไรเซชัน (Telomerization) และกระบวนการอิเล็กโตรเคมีคอล ฟลูออรีเนชัน (Electrochemical fluorination) ตามลำดับ ปฏิกริยาทางเคมีดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 (Lange และคณะ, 2006)





สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตสองชนิดสำคัญที่พบมาก ได้แก่ กรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก (PFOA) และสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (PFOS) ซึ่งนอกจากการสังเคราะห์สารสองชนิดนี้มาใช้ประโยชน์โดยตรงแล้ว การสลายตัวของสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนต อัลคิลคาร์บอกซิเลต และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนต อัลคิลซัลโฟเนต ยังจะได้ PFOA และ PFOS เป็นผลสุดท้ายอีกด้วย ทำให้สารทั้งสองชนิดนี้ได้ถูกพบมากและแพร่กระจายไปในสิ่งแวดล้อมทั่วโลก โดยมีการตรวจวัดเจือสารทั้งสองชนิดในแหล่งน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินทั่วไปในระดับต่ำ (ระดับนาโนกรัมต่อลิตร) ส่วนปริมาณที่พบในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำมีค่า PFOS มากกว่า 1,650 มิลลิกรัมต่อลิตร (Tang และคณะ, 2006) โดยแหล่งกำเนิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมหลักของสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนต อัลคิลคาร์บอกซิเลต และสารกลุ่มเพอร์ฟลูออรีเนต อัลคิลซัลโฟเนต มาจากอุตสาหกรรมฟลูออโร โพลีเมอร์และการทำสารดับเพลิง (Armitage และคณะ, 2006)

ในปัจจุบันทางหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมและอาชีวอนามัยทั่วโลก ทั้งหน่วยงานในสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป แคนาดา และออสเตรเลีย ได้พยายามลดการใช้และการนำเข้าวัสดุที่มีส่วนผสมของ PFOA และ PFOS โดยทางบริษัทผู้ผลิตได้นำสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตชนิดอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยกว่ามาใช้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะนำสาร PFOA และ PFOS กลับมาใช้ซ้ำเพื่อลดปริมาณการผลิต แต่ในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่นการทำภาพถ่ายและสารกึ่งตัวนำ (Photolithography and Semiconductors) ที่ต้องใช้ PFOS ยังไม่สามารถใช้สารชนิดอื่นแทนได้ทำให้ยังต้องมีการศึกษาหามาตรการหยุดยั้งไม่ให้สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมต่อไป โดยปริมาณการผลิตและการใช้ทั่วโลกของ PFOA ประมาณ 1,200 ตัน (ปี 2004) และ PFOS ประมาณ 3,500 ตัน (ปี 2000) (Lau และคณะ, 2007)

### 2.1.2 ความเป็นพิษของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต

สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตมีความแตกต่างจากสารเคมีตกค้างยาวนานที่อยู่ในรูปของคลอรีนและโบรมีนทั่วไป คือจะไม่สะสมในไขมัน แต่จะสะสมในโปรตีน ส่วนใหญ่อยู่ที่ตับ ไต กล้ามเนื้อ และในน้ำเลือด

ปริมาณของ PFOA และ PFOS ที่พบในน้ำเลือดของคนทั่วไปประมาณ 3 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 7 - 82 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Hansen และคณะ, 2002) โดย US EPA จัดให้ PFOA อยู่ในกลุ่มของสารคล้ายสารก่อมะเร็ง (Likely carcinogen) ส่วน PFOS นั้น องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organization for Economic Co-operation and Development - OECD) จัดให้เป็นสารพิษที่ทำอันตรายต่อตับและไต

### 2.1.3 ค่ามาตรฐานของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

Minnesota Department of Health ประกาศมาตรฐานน้ำดื่มเพื่อควบคุมปริมาณของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค (ปี 2007) โดย PFOA ควบคุมไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ PFOS ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.1.4 สารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนท

สารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนท (PFOS) เป็นสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่สำคัญ และถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลายมากที่สุดในกลุ่มของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท โดยมีผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดคือบริษัท 3M การนำสาร PFOS ไปใช้งานนั้นเน้นสมบัติหลักคือการเคลือบหรือปรับผิวให้ลื่น และกันน้ำหรือกันเปื้อน สามารถสรุปการนำไปใช้งานหลักๆ ได้ดังนี้

- ใช้เคลือบผิวโครเมียม (Chromium Plating)
- เป็นสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมการบิน (Aviation Hydraulic fluid)
- การทำภาพถ่ายและสารกึ่งตัวนำ (Photolithography and Semiconductors)
- เป็นสารดับเพลิง

โครงสร้างและสมบัติของสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนท แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติพื้นฐานของสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนท (Yong, 2007)

สมบัติพื้นฐาน	PFOS
ชื่อทางเคมี	Perfluorooctane sulphonic acid
สูตรเคมี	$C_8F_{17}SO_3^-$
มวลโมเลกุล	500.13
สูตรโครงสร้าง	$CF_3-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-S(=O)(=O)O^-$ 
CMC ที่ 25 °C	1.05 mM*
การละลายน้ำ ที่ 25 °C	pure water: 570 mg/L fresh water: 370 mg/L unfiltered seawater: 12.4 mg/L filtered seawater: 25 mg/L

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) สมบัติพื้นฐานของสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (PFOS)

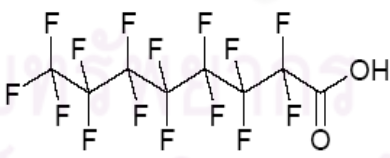
สมบัติพื้นฐาน	PFOS
จุดหลอมเหลว	> 400 °C
จุดเดือด	-
pKa	-3.27

\* (Tang และคณะ, 2006)

### 2.1.5 กรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก

กรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก (PFOA) เป็นสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนตที่สำคัญ มักถูกนำไปใช้ในรูปของเกลือแอมโมเนียม โดยสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย มีผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดคือบริษัท ดูปองค์ โดย PFOA เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตฟลูออโรโพลีเมอร์และฟลูออโรเทโกลเมอร์เป็นหลัก สามารถนำไปผลิตเป็นสารเคลือบผิว ภาชนะ และบรรจุภัณฑ์ที่รู้จักกันทั่วไปคือ เทฟลอน สารทำความสะอาด ฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น โครงสร้างและสมบัติของกรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติพื้นฐานของกรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิก (Yong, 2007)

สมบัติพื้นฐาน	PFOA
ชื่อทางเคมี	Perfluorooctanoic Acid
สูตรเคมี	$C_8HF_{15}O_2$
มวลโมเลกุล	414.07
สูตรโครงสร้าง	$F-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-CF_2-C(=O)-O$ 
CMC ที่ 25 °C	8 - 9.1 mM**
การละลายน้ำ ที่ 25°C	3.4 g/l
จุดหลอมเหลว	45-50 °C
จุดเดือด	189-192 °C
pKa	2.5

\*\* (Harada และคณะ, 2005)

## 2.2 กระบวนการบำบัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

**2.2.1 RO membrane filtration** กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่ออกมาจากอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำได้ตั้งแต่ความเข้มข้น 0.5 - 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่สารเคมีในน้ำเสียบางชนิดเช่น Isopropyl Alcohol จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO ลดลง จึงต้องมีการเพิ่มกระบวนการในการแยกสารนี้ออกก่อน (Tang และคณะ, 2006)

**2.2.2 Advanced Oxidation Process (AOPs)** สารเคมีที่ใช้มักจะใช้  $O_3/H_2O_2$ ,  $O_3/UV$ ,  $UV/H_2O_2$ ,  $UV/TiO_2$  และสารเคมีเฟนตัน ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทในสถานะปกติได้ ต้องทำที่สถานะ Subcritical เมื่อใช้เหล็ก Zero valent เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Hori และคณะ, 2006)

**2.2.3 Photolysis และ Photo-catalysis** กระบวนการนี้ใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการสลายโมเลกุลของสารเพอร์ฟลูออรีเนท อัลคิลคาร์บอกซิเลท ได้หมดสมบูรณ์เมื่อใช้ Immobilized  $TiO_2/Ni-Cu$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (24 ชั่วโมง) แต่วิธีนี้ไม่สามารถย่อยสลาย PFOS ได้ (Chen และคณะ, 2006)

**2.2.4 Granular activated carbon (GAC)** เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป ในการกำจัด กลิ่น สี และสารอินทรีย์ต่างๆ จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ GAC สามารถกำจัดสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนทได้ดี (94 เปอร์เซ็นต์) แต่กำจัดกรดเพอร์ฟลูออโรออกทาโนอิกได้น้อย (ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์) และการดำเนินงานวิธีนี้ต้องระมัดระวังเรื่องการดำเนินระบบ และการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำที่เหมาะสมด้วย (Ho, 2007)

**2.3 กระบวนการดูดซับ (adsorption process)** (กานดา สุธนกุลพานิช, ชุชัย ลืออุทัย และพิสุทธิ อนุรัตน์, 2545)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่ง ที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็ง ซึ่งก็คือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับนี้จะไม่รวมถึงกระบวนการการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสารลดลงไปนั้นเกิดจากกระบวนการดูดซับ กระบวนการโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน

หรือจากกระบวนการอื่นๆ แล้ว อาจเรียกกระบวนการนี้ว่า Sorption process สำหรับแรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แรงด้วยกันคือ

### 1. แรงทางกายภาพ (Physical force) ประกอบด้วย

#### 1.1 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

#### 1.2 แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force)

เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (Dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

### 2. แรงทางเคมี (Chemical force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับ แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถย้อนกลับไปได้ (Irreversible)



ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็ง และของเหลว นั้น สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า Adsorbent ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า Adsorbate

### 2.3.1 ลักษณะการดูดซับ

แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับโมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับในสารละลายด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นโมเลกุลของสารจะยึดติดแน่นบนพื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เกิดการผันกลับ (Reversible interaction) ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนออกจากตัวดูดซับนั้น และเรียกปรากฏการณ์ช่วงนี้ว่า Desorption

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ โดยการสร้างสารประกอบใหม่ระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับนั้น ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง และเนื่องจากการดูดซับเกิดเฉพาะบนพื้นที่ผิวบางแห่ง ทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด Desorption ได้ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

#### ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือไอโซเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูก

ดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น

3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าสำคัญในการพิจารณา

4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่หนึ่งแล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้

5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

### 2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับหรือการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

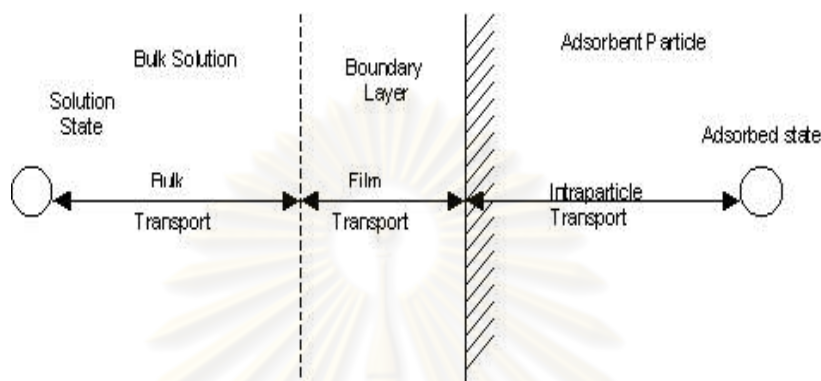
1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก Bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรง หรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

4. การดูดซับ เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนสารดูดซับ

ภายใต้สภาวะที่มีความปั่นป่วนน้อย การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่หากว่าภายในระบบมีความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการแพร่สู่รูพรุน (Pore diffusion) จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว โดยขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ

ที่มา: มั่นสิน ตันจุลเวศม์, 2542

### 2.3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

การดูดซับของสารละลายบนผิวของตัวกลางดูดซับ ในขณะที่เกิดการดูดติดไปเรื่อยๆ สารที่ถูกดูดซับก็มีแนวโน้มที่จะถูกคายกลับมาสู่สารละลายเหมือนเดิม ความเข้มข้นของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่จำนวนสารละลายที่ถูกดูดซับ และถูกคายกลับออกมา ก็จะมีปริมาณเท่าๆ กัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดซับ และอัตราการคายสารออกจะถึงจุดสภาวะสมดุลซึ่งจะเรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) โดยที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารละลายบนผิวของตัวกลางดูดซับ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับ โดยทั่วไปพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของตัวกลางดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ โดยผลของความสัมพันธ์นี้ถูกเรียกว่า “ไอโซเทอร์มการดูดซับ” (Adsorption isotherm) และใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นค่าคงที่แสดงถึงความจุของตัวกลางดูดซับที่สามารถดูดซับเอาสารต่างๆ ไว้ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบหาปริมาณของตัวกลางดูดซับที่จะใช้ในการดูดซับ ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับของสารต่างๆ จะหาได้จากการทดลองเท่านั้น โดยจะนำข้อมูลของการดูดซับที่ได้จากการทดลองไปสร้างกราฟ แล้วลากเส้นผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ซึ่งจะ

มีประโยชน์ในการหาความสามารถของตัวกลางดูดซับ และเปรียบเทียบชนิดของตัวกลางดูดซับเพื่อหาชนิดของตัวกลางดูดซับที่ดีที่สุด

ดังนั้นไอโซเทอร์มของการดูดซับคือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ และค่าความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอร์มของการดูดซับนั้นมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้อธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่สมการที่ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับอธิบายสมบัติการดูดซับที่สำคัญได้แก่ แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม และ บีอีทีไอโซเทอร์ม

### 2.3.3.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ

- โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
- พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- พลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

สมการแลงเมียร์เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.3

$$q = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots(2.3)$$

เมื่อ  $q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น  $C_e$  (มิลลิกรัมต่อกรัม)

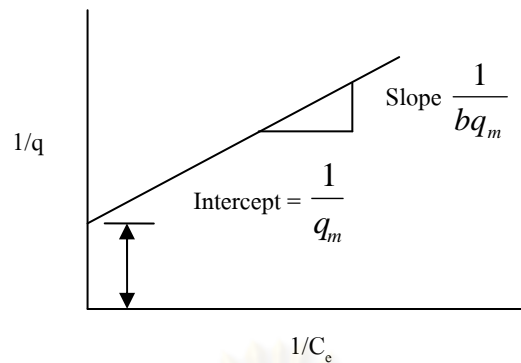
$q_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับมากที่สุดต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียง ชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$b$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงาน

จัดเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{b q_m} \frac{1}{C_e} \quad \dots(2.4)$$



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

### 2.3.3.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

การดูดซับแบบฟรุนด์ลิช เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นด้วยพันธะอ่อนๆ ใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 2.5

$$q_c = \frac{X}{M} = K_f C_e^{1/n} \quad \dots(2.5)$$

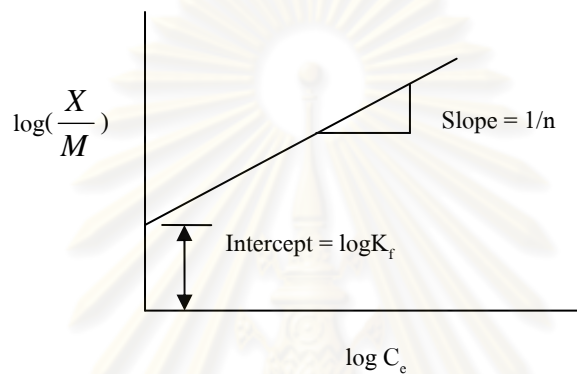
- เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $X$  = ปริมาณของสารที่ดูดซับ (มิลลิกรัม)  
 $M$  = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $K_f$  = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ  
 $1/n$  = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration dependence)

สมการฟรุนด์ลิช เมื่อเขียนกราฟค่า  $\frac{X}{M}$  และ  $C_e$  จากการทดลองลงบนกราฟ Log-Log จะได้ดังสมการที่ 2.6

$$\log\left(\frac{X}{M}\right) = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots(2.6)$$

สามารถหาค่า  $K_f$  และ  $1/n$  ได้โดยที่  $1/n$  เป็นค่าความชันของกราฟ และ  $K_f$  คือค่า  $\frac{X}{M}$  ที่ค่า  $C_c = 1$  ดังรูปที่ 2.4

หากค่า  $K_f$  และ  $1/n$  มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า  $1/n$  สูงแสดงว่า ความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

### 2.3.3.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบบีอีที (BET Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มสำหรับก๊าซที่ดูดซับบนผิวของแข็งแบบ Multimolecule Layer พัฒนามาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ
2. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
3. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
4. ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับชั้น

ต่อไป

บีอีทีไอโซเทอร์ม จะมีรูปสมการดังสมการที่ 2.7

$$\frac{X}{M} = \frac{ACX_m}{(C_s - C)\left[1 + (A - 1)\frac{C}{C_s}\right]} \quad \dots(2.7)$$



- เมื่อ  $X/m$  = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- $C$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- $A$  = ค่าคงที่ที่บรรยายพลังงานของการเกิดร่วมกันระหว่างสารถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

ค่าคงที่ในบีอีทีไอโซเทอร์มสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า  $\frac{C}{(C_s - C)(X/M)}$  กับค่า  $\frac{C}{C_s}$  หากค่า  $A$  ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{(A-1)}{A(Xm)}$  และค่าที่จุดตัดแกน  $Y$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{A(Xm)}$  และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{C}{(C_s - C) \frac{X}{M}} = \frac{1}{A(Xm)} + \frac{(A-1)}{A(Xm)} \cdot \frac{C}{C_s} \quad \dots(2.8)$$

### 2.3.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา และกลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบคือ

#### 2.3.4.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order model)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม คือปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.9

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \dots(2.9)$$

- เมื่อ  $k_1$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ชั่วโมง<sup>-1</sup>)
- $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

### 2.3.4.2 ปฏิกริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second-order model)

ปฏิกริยาอันดับสองเทียมจะอธิบายถึงกระบวนการดูดซับที่เป็นกระบวนการทางเคมี อัตราการเกิดปฏิกริยาจะขึ้นกับจำนวนของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ และจำนวนสารที่ถูกดูดซับที่สถานะสมดุล ปฏิกริยาอันดับสองเทียมสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \dots(2.10)$$

เมื่อ  $k_2$  = ค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)  
 $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าอัตราการดูดซับเริ่มต้น ( $h$ ) ได้จากสมการที่

2.11

$$h = k_2 q_e^2 \quad \dots(2.11)$$

## 2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

### 2.3.5.1 ลักษณะทางเคมีและกายภาพของตัวกลางดูดซับ

- พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน

ขีดความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive capacity) จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับมากขึ้น เมื่อตัวกลางดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนจะถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) ดังนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางดูดซับ ส่วนโครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวตัวกลางดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

### 2.3.5.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ

- ความสามารถในการละลาย

สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมากสามารถเกาะติดบนผิวได้ดี เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย

- น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุล

เป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อการดูดซับ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย (พอดีที่จะสามารถเข้าโพรงได้) ซึ่งโมเลกุลขนาดเล็กสามารถถูกดูดเข้าไปในโพรงของตัวกลางดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

### 2.3.5.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

- อุณหภูมิ

จะมีผลต่ออัตราและขีดความสามารถในการดูดซับ โดยอัตราเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ สำหรับขีดความสามารถในการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับอุณหภูมิ เพราะการดูดซับจะเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

- พีเอช

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดซับได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับ

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดอัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับอีกคือ

- ความปั่นป่วน

หากน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับจะมีความหนายู่มาก เพราะไม่ได้ถูกรบกวนจึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาตัวกลางดูดซับ หากให้น้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้การเคลื่อนตัวเข้าไปหาตัวกลางดูดซับทำได้รวดเร็วกว่า เป็นผลให้การแพร่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ด้วยเหตุนี้ ในกรณีความปั่นป่วน

สูงอัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นกับการแพร่ในรูพรุน และหากมีความปั่นป่วนต่ำ อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นกับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ

- เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของตัวกลางดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

## 2.4 อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

### 2.4.1 อนุภาคนาโน

ความหมายของนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ที่ถูกนิยามขึ้นโดยมูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Science Foundation, NSF) ของสหรัฐอเมริกามีอยู่ 3 มุมมองด้วยกันคือ

1. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอะตอม โมเลกุล หรือโมเลกุลมหภาค (Macromolecule) ที่มีขนาดเล็กในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร
2. การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโครงสร้าง อุปกรณ์ หรือระบบต่างๆ ที่มีสมบัติและหน้าที่ใหม่ๆ เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความเล็กในระดับนาโน (Nanoscale) ของสิ่งนั้นๆ
3. ความสามารถในการควบคุมและจัดการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในระดับอะตอม

ดังนั้นความหมายของนาโนเทคโนโลยี คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพและสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ (ฉัฐพันธุ์ สุภกา, 2549)

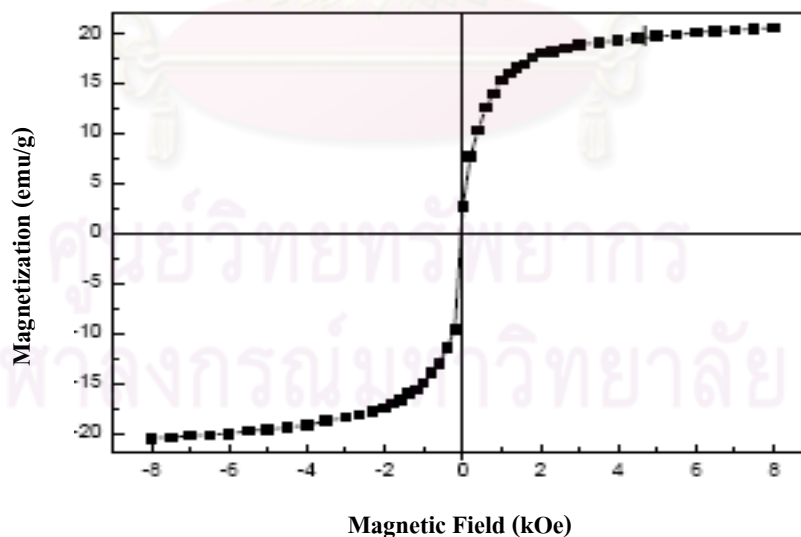
### 2.4.2 อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็กเป็นหนึ่งในสมบัติพิเศษที่เกิดขึ้นจากวัสดุระดับนาโน ซึ่งสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนี้ ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของอะตอม และลักษณะการจับตัวของอะตอมของธาตุ

ที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ โดยที่สามารถแยกสารและวัสดุออกเป็นกลุ่มต่างๆ ตามสมบัติทางแม่เหล็ก ได้ดังนี้

1. กลุ่มไดอามagnetic (Diamagnetic) วัสดุที่สามารถแสดงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) ในเชิงลบเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก
2. กลุ่มพาราแมกเนติก (Paramagnetic) วัสดุที่สามารถแสดงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กในเชิงบวกเล็กน้อย เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก
3. กลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) วัสดุที่สามารถรักษาสภาพแม่เหล็กให้คงอยู่ได้แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพแม่เหล็กไปได้ ทำให้วัสดุกลุ่มนี้มีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรม

เมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีขนาดเล็กลง จนถึงค่าวิกฤติค่าหนึ่ง ทำให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็กแบบใหม่ขึ้นมา นั่นคือ “ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic phenomenon)” โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic particles) จะมีสมบัติแม่เหล็กที่ไม่มั่นคงอันเนื่องมาจากการแปรปรวนของอุณหภูมิ โดยอนุภาคเหล่านี้จะไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่ได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก และเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กก็จะแสดงสมบัติแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก

ที่มา: Lui และคณะ, 2004

อนุภาคที่มีสมบัติแม่เหล็ก (Magnetic particles) มีการใช้มาตั้งแต่ช่วงกลางของปี 1970 มักใช้ในทางด้านชีววิทยาและทางการแพทย์ คุณสมบัติแม่เหล็กเป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้เคลื่อนที่ได้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ อาทิเช่น การใช้นำส่งยา หรือสารออกฤทธิ์ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกร่างกาย และการแยกทางชีวภาพ (Bioseparations)

Iron nanoparticles technology เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีทางสิ่งแวดล้อมในระดับนาโนที่เกิดขึ้นเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ด้วยวิธีการที่หลากหลาย เพื่อพัฒนาการผลิต Iron nanoparticles นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค และเพิ่มประสิทธิภาพการนำส่งและทำปฏิกิริยา ซึ่งการศึกษาในห้องปฏิบัติการนั้นแสดงให้เห็นว่า Iron nanoparticles มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของมลพิษในสิ่งแวดล้อมทั่วไป เช่น Chlorinated organic solvents, Organochlorine pesticides, PCBs, Organic dyes, สารประกอบอนินทรีย์อื่นๆ รวมถึงไอออนของโลหะ เช่น As (+3), Pb (+2), Cu (+2), Ni (+2) และ Cr (+6) เป็นต้น (Sun และคณะ, 2006)

#### 2.4.3 การสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก

วิธีการเตรียมหรือสังเคราะห์อนุภาค ที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กมีอยู่หลายวิธีดังนี้ (Bruce และคณะ, 2004)

- การออกซิไดซ์ของเฟอร์รัสซัลเฟตในสารละลายที่เป็นด่าง
- การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสารละลายต่าง ของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกคลอไรด์
- การตกตะกอนร่วมของสารละลายเฟอร์รัสและเฟอร์ริกคลอไรด์ด้วยการไฮโดรไลซิสของยูเรีย

สำหรับวิธีการสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนร่วมของเหล็กเป็นวิธีที่ง่ายและได้ผลดี โดยใช้ การตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) และเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ร่วมกัน ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง จะทำให้เกิดเป็นแมกเนไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) โดยมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งใช้อัตราส่วน โมล  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  เท่ากับ 1:2 และต้องมีการควบคุมให้อยู่ในสภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน เพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ ซึ่งจะได้อนุภาคนาโนที่มีการกระจายตัวที่ดีและขนาดสม่ำเสมอ

#### 2.4.4 การประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นาโนเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาขึ้นซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างคุณสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ทาง Biomedical และการวินิจฉัยโรคมามากขึ้น ดังนั้นจึงมีความคิดว่าจะสร้างวัสดุที่มีโครงสร้างนาโน และมีความ



หลากหลาย ด้วยการปรับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพื้นผิว ซึ่งที่ผ่านมามีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค โดยการสร้างชั้นอะตอมของสารอินทรีย์โพลีเมอร์ หรือโลหะอนินทรีย์ (เช่น ทอง) พวกออกไซด์ (เช่น ซิลิกา หรืออะลูมินา) ที่เหมาะสมกับ Functionalization เพื่อติดต่อกับโมเลกุลต่าง ๆ (Berry และ Curtis, 2003 อ้างถึงใน Gupta, A.K. และ Gupta, M., 2005)

การนำอนุภาค Iron oxide ขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้การวินิจฉัยโรคในหลอดแก้วมีการทดลองใช้เป็นเวลากว่า 40 ปีแล้ว ซึ่งในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Iron oxide ชนิดต่างๆ กันมากขึ้น ทำให้มีการนำ Magnetic particles ขนาดนาโนเข้ามาใช้ด้วย ส่วนใหญ่จะเป็นแมกนีไทต์ ( $Fe_2O_3$ ) หรือแมกเนไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) ซึ่งมี Biocompatibility ที่ดี สามารถนำไปใช้ประโยชน์ อาทิเช่น การใช้นำส่งยาหรือสารออกฤทธิ์ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกในร่างกาย และการแยกทางชีวภาพ (Bioseparations) เช่น

1. การบำบัดรักษาเกี่ยวกับเซลล์ เช่น cell labeling, targeting และเป็นเครื่องมือในการวิจัยทางชีววิทยาของเซลล์เพื่อแยกและทำให้เซลล์บริสุทธิ์
2. การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ
3. การส่งถ่ายยา (Drug delivery)
4. Magnetic Resonance Imaging (MRI)
5. Hyperthermia
6. Magnetofection

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้นั้น อนุภาคจะต้องมีคุณสมบัติความอิ่มตัวแม่เหล็กสูง (Magnetic saturation), Biocompatibility และมีพื้นผิวที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ คุณสมบัติของพื้นผิวของ Magnetic nanoparticles ที่เหมาะสมนั้นจะมีประสิทธิภาพทั้งการนำไปใช้ในร่างกาย (In vivo) และการทดลองในหลอดแก้ว (In vitro)

การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดมลสารในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับผิววนั้น สามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบผิวด้วยซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมต่อการดูดซับมลสารในน้ำเสียที่ต้องการ เช่น หมู่อะมิโนที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่มีสมบัติความชอบน้ำได้ดี หรือหมู่เมอร์แคปโตที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำได้ดี เป็นต้น ซึ่งข้อดีของวัสดุประเภทนี้คือสามารถที่จะเพิ่มคุณสมบัติการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับต่อการดูดซับมลสารที่ต้องการได้ และนอกจากนี้ การที่อนุภาคมีสมบัติทางแม่เหล็กทำให้สามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำได้ง่ายโดยใช้แรงจากสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งเป็นสมบัติที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการบำบัดน้ำเสีย

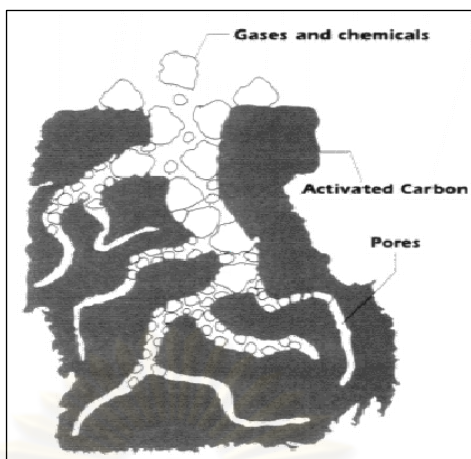
## 2.5 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) (สุจินัย คุษเสงี่ยม, 2545)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการกระตุ้น (Activation) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเป็นจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับ ความจุในการดูดซับ และมีความว่องไวในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก และพื้นผิวมีโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous structure) โดยถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500 – 1,400 ตารางเมตรต่อกรัม

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด แต่ต้องมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยวัตถุดิบที่ต่างกันจะทำให้พื้นที่ผิวและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แตกต่างกันออกไปตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ เช่น ไม้ชนิดต่างๆ กะลามะพร้าว ขางพารา เปลือกถั่ว กากชานอ้อย ขี้เลื่อย กระจุกสัตว์ ถ่านพีช หรือกากของผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียม โดยจะผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนหรือโพรงจำนวนมากที่ผิวภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ ดังนั้นพื้นที่ผิวสูงจึงมีความสามารถในการดูดซับสูงตามไปด้วย

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งตามรูปร่างลักษณะได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon; PAC) และถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ด (Granular Activated Carbon; GAC) โดยตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2532 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง หมายถึงปริมาณถ่านที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด หมายถึงปริมาณถ่านที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปัจจุบันถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมสูง ทั้งอุตสาหกรรมทำน้ำกากป้องกันก๊าซพิษ กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ กำจัดสารออร์แกนิกซัลเฟอร์จากโรงงานอุตสาหกรรม หรือกำจัดกลิ่นในอากาศ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามึลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูพรุนนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน ลักษณะรูที่เกิดขึ้นอยู่วิธีการเตรียมและวัตถุดิบที่ใช้ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนกระจัดกระจาย โครงสร้างที่มีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก เรียกว่า โครงสร้างผสม (Mixed structure type) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะ โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์  
ที่มา: มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2542

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 – 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อความจุในการดูดซับ จะมีประมาณร้อยละ 90 – 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย โดยหมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด เช่น หมู่คาร์บอกซิล และฟีนอล เป็นต้น

## 2.6 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

### 2.6.1 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว

การวัดพื้นที่ผิวจะใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนผิวของแข็ง ซึ่งปกติจะใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล ณ สภาวะมาตรฐาน (จุดเดือด  $-195.8$  องศาเซลเซียส) ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งสามารถวัดและคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวได้โดยใช้โมโนแกรม วิธีการคือใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน Cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมานอมิเตอร์ โดยมีวิธีการดังนี้

1. อบตัวอย่างสารดูดซับที่  $110$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $3$  ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา  $0.02-0.05$  กรัม ใส่งใน Adsorption vessel

2. วางเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างไว้ลงใน Heating Thermostat

3. อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซในโตรเจนธรรมดาที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดโมเลกุลของก๊าซในโตรเจนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด

4. ใช้เซลล์ 2 เซลล์ ที่มีปริมาตรเท่ากันโดยเซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์เปล่า

5. ผ่านก๊าซในโตรเจนลงไปเซลล์ทั้งสอง ภายใต้อุณหภูมิปกติที่อุณหภูมิห้อง

6. ทำให้เซลล์ทั้งสองเย็นจัดใน Cold Bath ที่บรรจุในโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซในโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างเซลล์ทั้งสอง ซึ่งวัดได้โดยใช้ Differential Monometer

7. อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวด้วย BET ไอโซเทอร์มดังกล่าวที่

2.12

$$\frac{P}{V(P_o - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_o} \quad \dots(2.12)$$

- โดย
- V = ปริมาตรของก๊าซในโตรเจนที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P
  - $V_m$  = ปริมาตรของก๊าซในโตรเจนในการคลุมพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบ โมเลกุลชั้นเดียว (Mono-molecule Layer)  
(ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลูกบาศก์เมตร)
  - P = ความดันที่สภาวะใดๆ (มิลลิเมตรปรอท)
  - $P_o$  = ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว (Vapor pressure or Saturated vapor)  
(มิลลิเมตรปรอท)
  - C = ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

#### การคำนวณหาค่าพื้นที่ผิว

เทคนิคที่ใช้ในการวัดพื้นที่ผิวของสารที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ วิธีการวัดหลายจุด (Multipoint method) โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซในโตรเจน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากเครื่องคือ ปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับหรือคายออกจากผิวของสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นของก๊าซในโตรเจนต่างๆ กัน จากสมการที่ (2.12) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$Y = a + bX \quad \dots(2.13)$$

$$\text{โดยที่} \quad Y = \frac{P}{V(P_o - P)} \quad , \quad a = \frac{1}{V_m c}$$

$$X = \frac{P}{P_o} \quad , \quad b = \frac{C-1}{V_m C}$$

ถ้าทราบค่า  $V_m$  เราสามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง (ตัวกลางดูดซับ) ได้โดยอาศัยหลักการที่ว่าจากปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารตัวอย่าง สามารถนำไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับได้ และโดยที่พื้นที่หน้าตัดของก๊าซหนึ่งโมเลกุลเป็นค่าที่ทราบ จึงคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างที่ทดสอบได้ สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$S_{SP} = NA \cdot a_{\max} \cdot S_o / W \quad \dots(2.14)$$

โดยที่	$S_{SP}$	=	พื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่าง (หน่วย ตารางเซนติเมตรต่อกรัม หรือตารางเมตรต่อกรัม)
	$NA$	=	เลขอาโวกาโดรน์มเบอร์ ( $6.02 \times 10^{23}$ โมล <sup>-1</sup> )
	$a_{\max}$	=	จำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้น โมเลกุล = $V_m/22414$ ลูกบาศก์เซนติเมตร
	$S_o$	=	พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลก๊าซที่ถูกดูดซับ (หน่วย ตารางเซนติเมตร หรือตารางเมตร)
	$W$	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (ตัวดูดซับ) (หน่วยกรัม)

## 2.6.2 การวิเคราะห์รูปร่างและขนาดอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การตรวจวิเคราะห์รูปร่างและขนาดอนุภาคของสารดูดซับจะใช้การหาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนลำแสง ซึ่งมีกำลังขยายสูง 10 - 300,000 เท่า สำหรับการทำงานนั้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากต้นกำเนิด และถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage) ผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ จะทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงมาก จากการทำอิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กอยู่รอบตัวในแนวตั้งฉาก ในขณะที่อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่นั้นเราสามารถบังคับอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้ โดยอำนาจสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นในกล้อง



กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ใช้ในการศึกษาโครงสร้าง หรือองค์ประกอบของวัตถุตัวอย่าง โดยทำให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปบนพื้นผิว โดยอุปกรณ์ตรวจจับซึ่งอยู่ภายในจะจับเอาอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากชิ้นงานแล้วแสดงผลบนจอโทรทัศน์ ซึ่งสามารถที่จะบันทึกภาพได้ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้เป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่นการวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร

### 2.6.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยใช้ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry)

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโคป ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาใช้วิเคราะห์อย่างแพร่หลาย เพื่อศึกษาสมบัติของพื้นผิวของสารดูดซับที่จะส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับ ในการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปในงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงสเปกตรัม 400 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ (Punyapalukul, 2004)

หมู่ฟังก์ชัน	IR spectra bands ( $\text{cm}^{-1}$ )	อ้างอิง
O-Si-O	470	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Si-O	1100	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Ring structure of $\text{SiO}_4$	800	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ,
Si-OH	973	Roy และคณะ, 1996
H-O-H	3457	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978
Deformation mode of $\text{H}_2\text{O}$	1650-1600	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978



ตารางที่ 2.4 (ต่อ) หมู่ฟังก์ชันที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ (Punyapalakul, 2004)

หมู่ฟังก์ชัน	IR spectra bands (cm <sup>-1</sup> )	อ้างอิง
O-H	3750	Partiff และคณะ, 1985
CH <sub>3</sub> of ethoxy group	2970	Brunel และคณะ, 1995
-CH <sub>2</sub> - stretching vibration	2940	Brunel และคณะ, 1995
C-H of alkyl and phenyl groups	1500-1300	Wang และคณะ, 1999
-SH-	2575	Shylesh และคณะ, 2007
-NH <sub>2</sub> -	3390	Oh และคณะ, 2007

2.6.4 การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว (Schulthess และคณะ, 1986 และ Al-Ghouti และคณะ, 2003 อ้างถึงใน Punyapalakul, 2004)

หลักการของการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า จะต้องใช้ค่าจากจุดทุกจุดที่ได้จากกราฟของการไทเทรต โดยผลรวมของประจุลบเท่ากับผลรวมของประจุบวก

สำหรับตัวอย่างในการไทเทรตพื้นผิวออกไซด์แอมโฟเทอริกด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในรูปของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ ได้ผลดังสมการที่ 2.15

$$[\text{OH}^-] + [\text{Cl}^-] + [\text{negative surface}] = [\text{H}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{positive surface}] \quad \dots(2.15)$$

หรือ

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= [\text{positive surface}] - [\text{negative surface}] \\ &= [\text{CA} - \text{CB}] - [\text{H}^+ - \text{OH}^-] \end{aligned} \quad \dots(2.16)$$

เมื่อ

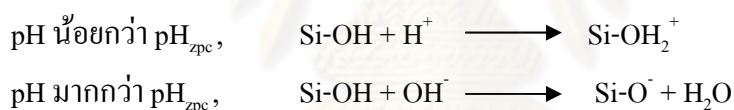
$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \text{ประจุบนพื้นผิว} \\ [\text{positive surface}] &= \text{ความเข้มข้นของประจุบวกบนพื้นผิว} \\ [\text{negative surface}] &= \text{ความเข้มข้นของประจุลบบนพื้นผิว} \\ [\text{H}^+] &= 10^{-\text{pH}} \\ [\text{OH}^-] &= 10^{\text{pH}-\text{pK}_w} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{Cl}^-] &= [\text{NaCl}]_{\text{add}} + [\text{HCl}]_{\text{add}} \\
 [\text{Na}^+] &= [\text{NaCl}]_{\text{add}} + [\text{NaOH}]_{\text{add}} \\
 [\text{CA} - \text{CB}] &= [\text{Cl}^-] - [\text{Na}^+] \\
 &= [\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}}
 \end{aligned}$$

เมื่อประจุบนพื้นผิวเป็นกลาง ประจุลบและประจุบวกบนพื้นผิวจะมีค่าเท่ากัน หมายความว่า บนพื้นผิวมีประจุเป็นศูนย์ ที่พีเอชที่มีประจุเป็นศูนย์นี้ ( $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.17

$$[\text{CA} - \text{CB}] = [\text{H}^+ - \text{OH}^-] \quad \dots(2.17)$$

หมู่ไฮดรอกซิลจะแสดงบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นซิลิเกต ซึ่งโปรตอนสามารถเพิ่มหรือลดไปได้ ผลของประจุบนพื้นผิวจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ที่พีเอชต่ำพื้นผิวจะมีการเพิ่มโปรตอน และจะกลายเป็นประจุบวก และที่พีเอชสูงจะมีการสูญเสียโปรตอน ทำให้พื้นผิวเป็นประจุลบ



ค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ของวัสดุที่เป็นซิลิเกต จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น Cabot L90, diatomite และ FSM-16 มีค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  เท่ากับ 2 - 3.7, 4 - 7 และประมาณ 6 ตามลำดับ

## 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวกับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

Campo และคณะ (2005) ได้ใช้ Aminopropyltriethoxysilane (APTS) เป็นสารในการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนให้กับแมกเนไทต์ และแมกเนไทต์ที่เคลือบด้วยซิลิกา จากนั้นนำไปทดสอบผลของความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวแมกเนไทต์ และแมกเนไทต์ที่เคลือบด้วยซิลิกา ต่อประสิทธิภาพการจับ DNA โดยทำการแปรอุณหภูมิที่ 18, 50 และ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1-24 ชั่วโมง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาจะมีผลทำให้ความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวต่างกัน จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 24 ชั่วโมง มีความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวมากที่สุด และเมื่อนำอนุภาคที่

สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการจับ DNA พบว่าประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของหมู่อะมิโนบนพื้นผิว

**Lui, Ma และคณะ (2004)** ได้ทำการสังเคราะห์ Magnetite nanoparticles ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) และเหล็กเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) โดยใช้  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$  และ  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  ในสัดส่วน 1:2 ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน โดยจะได้แมกเนไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) ที่มีขนาด 8-10 นาโนเมตร จากนั้นทำการเคลือบด้วยซิลิกา (ใช้ Sodium Silicate) ที่พีเอช 12-13 จะได้เป็น Magnetite silica nanospheres โดยขนาดของอนุภาคสามารถควบคุมได้ด้วยการแปรสัดส่วนระหว่าง  $SiO_2$  ต่อ  $Fe_3O_4$  จากนั้นทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยการใช้ N-(2-Aminoethyl)-3-Aminopropyltrimethoxysilane (AEAPS) แล้วนำไปทำการกระตุ้นด้วย Glutaraldehyde ทำให้ได้อนุภาคขนาด 100-200 นาโนเมตร ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เมื่ออนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบด้วยวิธี Powder X-ray Diffraction (XRD) พบว่าอนุภาคที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าว มีการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนดีทั่วทั้งอนุภาค เมื่อนำอนุภาคที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนไปทดลองการจับโปรตีน (Protein immobilization) จะได้ผลดีกว่าการใช้ Magnetite silica nanospheres ที่ไม่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

**Liu, Xing และคณะ (2004)** ได้ทำการสังเคราะห์แมกเนไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของเกลือเฟอร์รัสและเฟอร์ริก ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำมาเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกต (ใช้ Acidity technology) ซึ่งได้เป็น Magnetic silica nanospheres ที่มีการกระจายตัวมีขนาด 50-80 นาโนเมตร และนำอนุภาคที่ได้มาต่อติดหมู่อะมิโนด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (AEAPS) จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วย Glutaraldehyde เพื่อใช้จับ Bovine serum albumin (BSA) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ใช้ทดลองโดยได้ทำการศึกษาผลของพีเอช Ionic strength และความเข้มข้นเริ่มต้นของ BSA ต่อประสิทธิภาพการจับ BSA ของอนุภาค จากการทดลองอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการจับ BSA มากกว่า 86 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5

## 2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก

**Chin และคณะ (2005)** ทำการศึกษาการกำจัดอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่ออกมาจากกระบวนการขัดล้างในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ (CMP waste water) ซึ่งน้ำเสียที่ออกมามีค่าความขุ่นและของแข็งแขวนลอยสูง ด้วยการใช้อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนช่วยในการรวมตัวของอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนในน้ำเสีย โดยในการทดลองใช้ค่าพีเอช 6 และไม่มีการเติมเกลือในน้ำเสีย สามารถลดค่าความขุ่นของน้ำเสียจาก 110 NTU เหลือเพียง 7 NTU ซึ่งจากผลการ

ทดลองอธิบายได้ว่าที่พีเอช 6 อนุภาคซิลิกาจะมีประจุบนพื้นผิวเป็นลบ ( $pH_{zpc} = 2.2$ ) ในขณะที่อนุภาคแม่เหล็กมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวก ( $pH_{zpc} = 6.7$ ) ทำให้ทั้งสองอนุภาคนี้เกิดการรวมตัวกันด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า ส่วนผลของเกลือ (NaCl) นั้นจะมีผลต่อค่า Zeta potentials ของทั้งสองอนุภาคซิลิกาและอนุภาคแม่เหล็ก คือเมื่อได้ NaCl เพิ่มขึ้นค่า Zeta potentials จะยิ่งลดลงซึ่งทำให้สารสองตัวมีแรงทางไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคแม่เหล็กที่ดีและการเพิ่มแรงของสนามแม่เหล็ก (>800 เกาส์) จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นด้วย

**Sakai และคณะ (1997)** ทำการศึกษาการใช้อนุภาคแม่เหล็ก ( $Fe_3O_4$ ) แบบเฟอร์โรแมกเนติกช่วยในการแยกตะกอนสลัดจ์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำเสีย โดยการทดลองได้ใช้  $Fe_3O_4$  ต่อ MLVSS เท่ากับ 1:1 จากการทดลองระบบสามารถแยกสลัดจ์ออกจากน้ำที่มีค่าความเข้มข้นสลัดจ์ 13-22 กรัม VSS ต่อลิตร ได้หมดภายในเวลา 5 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบการแยกสลัดจ์โดยทั่วไป โดยการทดลองสามารถกำจัด TKN 89% และ COD 92% โดยมีอัตราการอินทรีย์เท่ากับ 0.92 กรัม COD ต่อลิตร-วัน และ 0.10 กรัม TKN ต่อลิตร-วัน โดยมีอัตราการหยุดเติมอากาศต่อการเติมอากาศเท่ากับ 40:20 นาที

**Wu และคณะ (2004)** ศึกษาการกำจัด Azo-dye Acid Red B (ARB) ด้วยกระบวนการดูดซับและเร่งการเผาไหม้ (Adsorption and Catalytic combustion) โดยใช้คอปเปอร์เฟอไรท์ (Magnetic  $CuFe_2O_4$ ) จากผลการทดลองพบว่า Magnetic  $CuFe_2O_4$  สามารถดูดซับ ARB ได้ดีที่ พีเอช < 5.5 และยังสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยการใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย คือการใช้แรงสนามแม่เหล็กแยก จากนั้นเมื่อนำ Magnetic  $CuFe_2O_4$  ที่ดูดซับ ARB ไปเผา พบว่ามีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการเผาทำลาย ARB ลงถึง 100 องศาเซลเซียส และไม่มีสารอินทรีย์หลุดออกมาระหว่างการเผาหรือเหลือติดอยู่กับอนุภาค  $CuFe_2O_4$

### 2.7.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต

**Ochoa และคณะ (2008)** ศึกษาการกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต (Perfluorinated surfactants) สามชนิดคือ กรดเพอร์ฟลูออโรออกทานอิก (PFOA) เพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (PFOS) และเพอร์ฟลูออโรบิวเทนซัลโฟเนต (PFBS) ด้วยกระบวนการดูดซับโดยเลือกใช้สารดูดซับสามชนิด คือ ถ่านกัมมันต์แบบเกรด (GAC) ซีโอไลต์ และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับด้วย GAC ที่พีเอช 7.2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตในช่วง 15-150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิจัยพบว่า GAC สามารถดูดซับสาร PFOS ได้ดีกว่า PFOA และ PFBS โดยมีความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 182, 57 และ 48 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ โดยที่ GAC มีความสามารถในการดูดซับสูงในช่วงความเข้มข้นต่ำ คือที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจากการทดลองอธิบายได้ว่าความยาว

ของสาย ฟลูออโรคาร์บอนและชนิดของหมู่ฟังก์ชันมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิวประจุลบของ GAC โดยสายฟลูออโรคาร์บอนยิ่งสั้น จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ PFOS กับตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดได้ผลดังนี้คือ GAC > ซีโอไลต์ > Anaerobic granular sludge > Activated sludge นอกจากนี้ จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของซีลิกาพบว่า เมื่อเพิ่มความไม่ชอบมากขึ้นความสามารถในการดูดซับสาร PFOS ของซีลิกาจะเพิ่มมากขึ้นด้วย

**Yu และคณะ (2008)** ศึกษาการกำจัดสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (PFOS) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยการใช้ไคโตซานที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Epichlorohydrin (ECH) และ PFOS ให้มีพื้นผิวที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีนในช่วง 15-150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษากิจกรรมของไอโซเทอร์ม ผลของพีเอช ผลของไอออนในน้ำ และผลของการเลือกดูดซับ จากผลการทดสอบกิจกรรมของไอโซเทอร์ม พบว่า เวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับของไคโตซานที่มีการปรับปรุงพื้นผิว (MIP) และไคโตซานที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว (NIP) เท่ากับ 48 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถใช้อธิบายอัตราการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิดได้ดี ซึ่งบ่งบอกได้ว่ากลไกการดูดซับมีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดย MIP มีความสามารถดูดซับ PFOS ได้ถึง 560 ไมโครโมลต่อกรัม ขณะที่ NIP สามารถดูดซับ PFOS ได้เพียง 258 ไมโครโมลต่อกรัม และพบว่ากลไกที่สำคัญในการดูดซับ PFOS คือแรงดึงดูดระหว่างประจุ โดยช่วงของพีเอชที่เหมาะสมคือช่วงพีเอช 4-6 ที่ประจุบนพื้นผิวดูดซับเป็นบวก นอกจากนี้ พบว่าค่าไอออนในน้ำมีผลต่อการละลายน้ำของ PFOS โดยเมื่อเพิ่มค่าไอออน (NaCl) ในน้ำมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้ค่าการละลายน้ำของ PFOS เริ่มลดลง

**Yu และคณะ (2009)** ศึกษาการกำจัดสารเพอร์ฟลูออโรออกเทนซัลโฟเนต (PFOS) และกรดเพอร์ฟลูออโรออกทานอิก (PFOA) โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดแกร็ด (GAC) และเรซิน (AI 400) โดยทำการศึกษากิจกรรมของไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด จากการศึกษาจากกิจกรรมการดูดซับที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า GAC และเรซินเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับที่เวลา 168 ชั่วโมง ในขณะที่ PAC เข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับที่เวลาเพียง 4 ชั่วโมง โดยที่ขนาดของอนุภาคที่เล็กและมีพื้นที่ผิวภายนอกที่ทำปฏิกิริยาได้มากเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การดูดซับ PFOS และ PFOA ของ PAC เกิดขึ้นได้เร็วกว่า GAC และเรซิน นอกจากนี้ยังสามารถใช้สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในการอธิบายอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นของตัวกลางดูดซับทุกชนิดได้ดี จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับที่ความเข้มข้น 20-250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า GAC มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำที่สุด โดยที่ PAC และเรซิน มีประสิทธิภาพการดูดซับ PFOS และ PFOA สูงที่สุดตามลำดับ มีค่าความสามารถในการดูดซับ



สูงสุดจากการใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ที่ 520 และ 1460 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ โดยจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าแรงดึงดูดทางประจุ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน รวมถึงความไม่ชอบน้ำ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 2.7.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของเกลือเฟอร์รัสและเฟอร์ริก ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบซิลิกาและต่อติดหมู่ฟังก์ชัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตรึงสารที่ต้องการไว้บนพื้นผิวของอนุภาคได้ และเนื่องจากอนุภาคมีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่สามารถแยกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กได้ทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการรวมกับอนุภาคอื่นๆ และแยกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กได้ ซึ่งเป็นสมบัติที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ทางการบำบัดน้ำเสีย

สำหรับการกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนตในน้ำด้วยวิธีการดูดซับนั้น ได้มีการทดลองเลือกใช้ตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดเกร็ด และชนิดผง ซีโอไลต์ และสัจจาจากระบบบำบัดน้ำเสีย รวมถึงยังได้มีการนำวิธีการปรับปรุงพื้นผิวตัวกลางดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมาใช้ โดยพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับคือค่าพีเอช ซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวทั้งของมลสาร และตัวกลางดูดซับ โดยเมื่อสามารถทำให้เกิดแรงดึงดูดทางประจุจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น นอกจากนี้ความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต ด้วยกระบวนการดูดซับบนตัวกลางอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เพื่อศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และพีเอชต่อการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต และทำการศึกษาประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนต พร้อมทั้งกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำการทดลองและวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (Total Organic Carbon; TOC) รุ่น TOC Vcph, SHIMADZU
2. เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) รุ่น Spectrum One, PerkinElmer
3. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิว BET รุ่น Autosorb 1C, Quantachrome Instrument, U.S.A.
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-6400
5. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น Basic A2103, Sartorius
6. เครื่องเขย่า รุ่น OS-3, Orbital Shaker
7. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น ISE meter 51775-11, HACH
8. เครื่องกวนใบพัด (Mechanical stirrer), Sciencetific Promotion
9. เครื่องเขย่าคลื่น โชนิก
10. ตู้อบความร้อน (Oven) รุ่น U500
11. แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม

12. ชุดกรองแบบสุญญากาศ รุ่น N026
13. กระดาษกรอง GF/C 47 mm, Whatman
14. เครื่องวัดความขุ่น รุ่น PC Checkit, Lovibond
15. เครื่องกลั่นแบบซอกเลต (Soxhlet) รุ่น RE6
16. เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) รุ่น HVE-50, HIRAYAMA
17. UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Helios Alpha, Thermo Electron
18. ตู้ย่อยแบบไมโครเวฟ รุ่น ETHOS SEL, Milestone

### 3.1.2 สารเคมี

1. เฟอร์รัสคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), SIGMA
2. เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), SIGMA
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) 28-30 %, J.T.Baker
4. เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) GC Grade 98 %, Fluka
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37 %, CARLO ERBA
6. สารละลายเมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) HPLC Grade, CARLO ERBA
7. กรดไขมัน (Oleic acid), PANREAC
8. สารละลาย 2- โพรพานอล ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ) AR Grade, QReC
9. โทลูอีน ( $\text{C}_8\text{H}_5\text{CH}_3$ ), CARLO ERBA
10. 3-Aminopropyltrimethoxysilane 97 %, Fluka
11. 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane 95 %, Aldrich
12. n-Octyldimethylchlorosilane 97 %, Fluka
13. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), CARLO ERBA
14. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 99%, LAB SCAN
15. กลีเซอรอล 87%, Merck
16. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), Riedel-de Haen
17. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), Riedel-de Haen
18. โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ), LAB SCAN
19. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง, Shirasaki S-10, Japan EnviroChemicals Ltd.

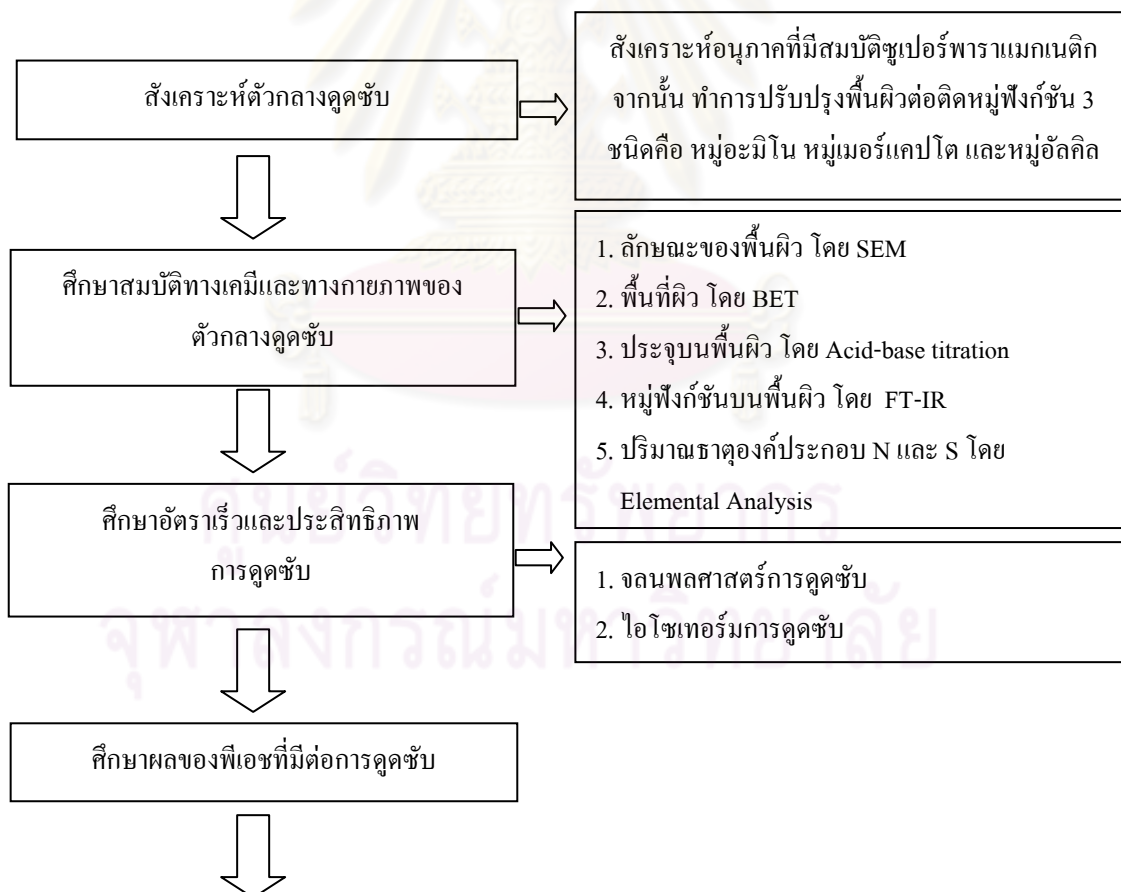
### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และต่อติดด้วยหมู่ฟังก์ชันฟังก์ชัน 3 ชนิดคือ หมู่อะมิโน หมู่เมอร์แคปโต และหมู่อัลคิล และทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นทดสอบการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

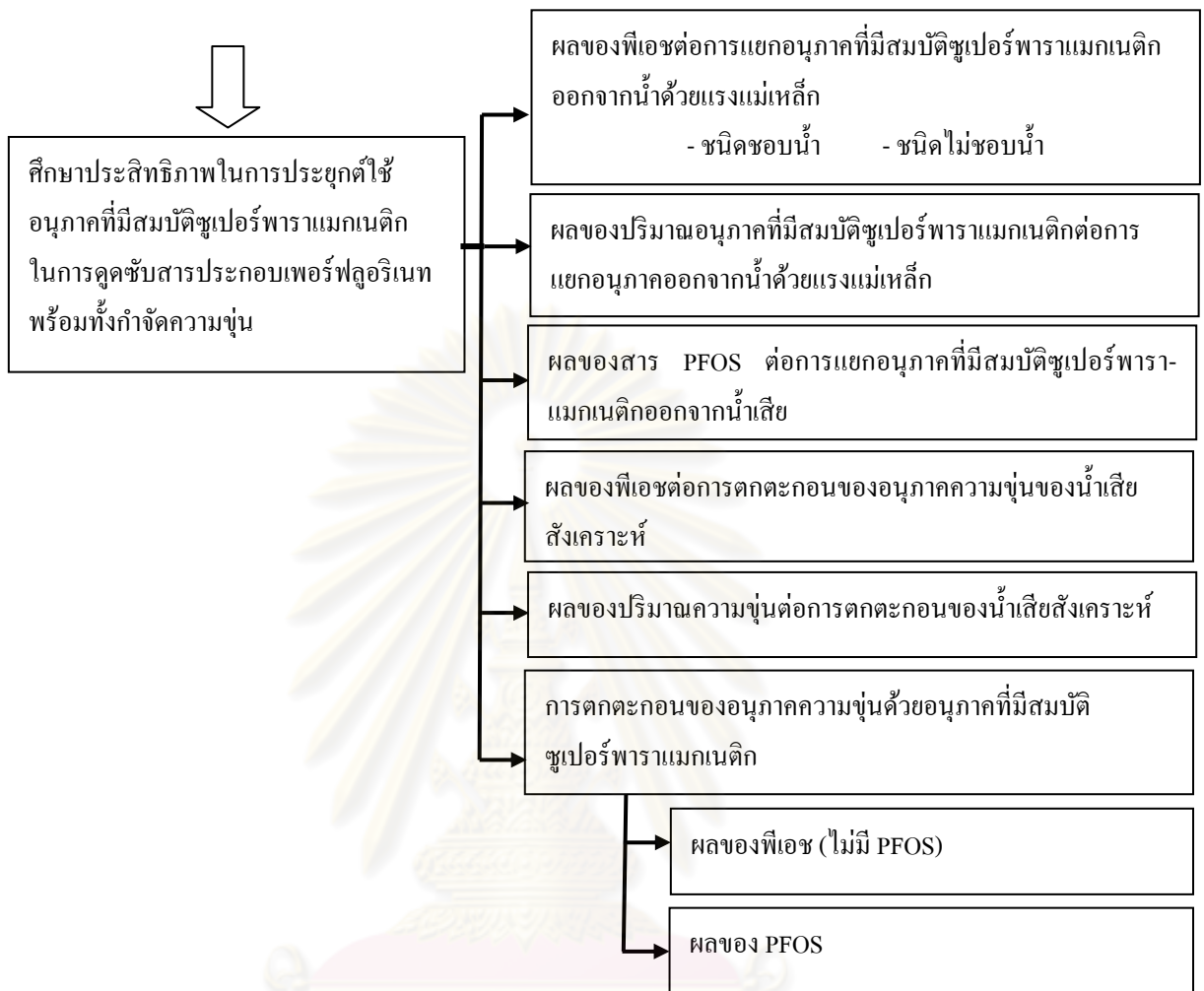
2. ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทในน้ำเสียสังเคราะห์

3. ศึกษาประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท พร้อมทั้งกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์

สามารถสรุปเป็นแผนภาพโดยสังเขปดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



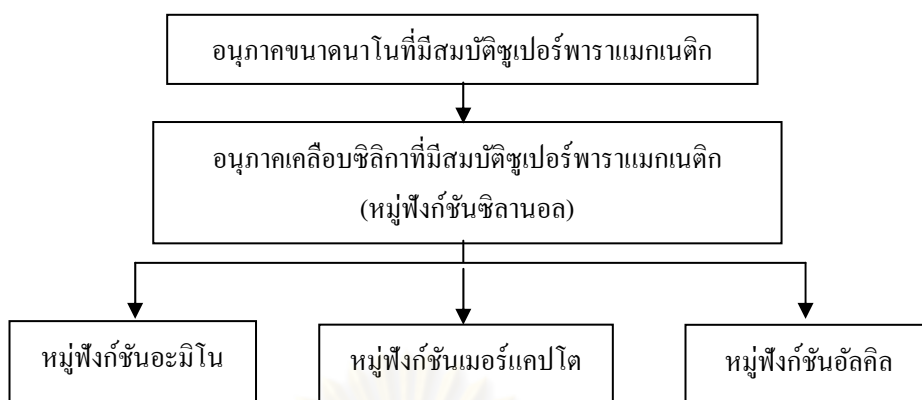
รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก  
ชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



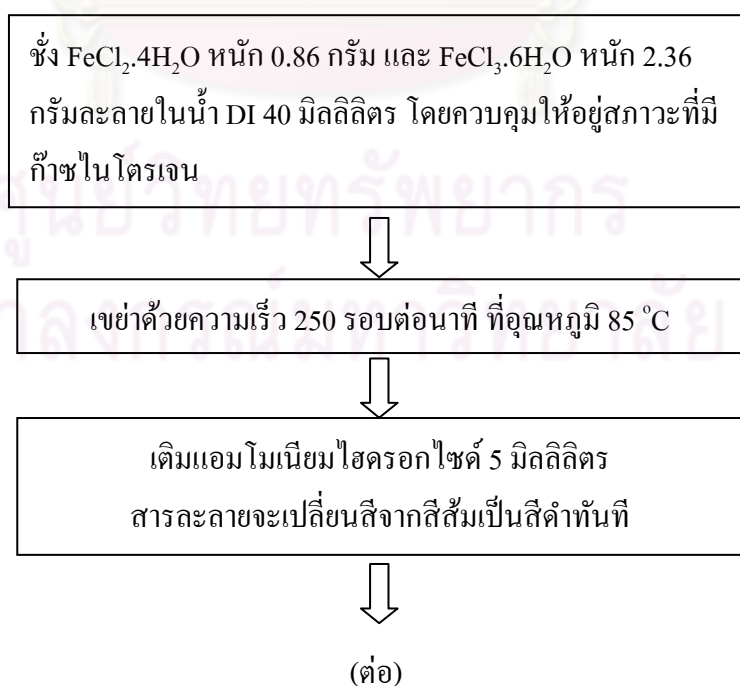


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางคูดซบอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

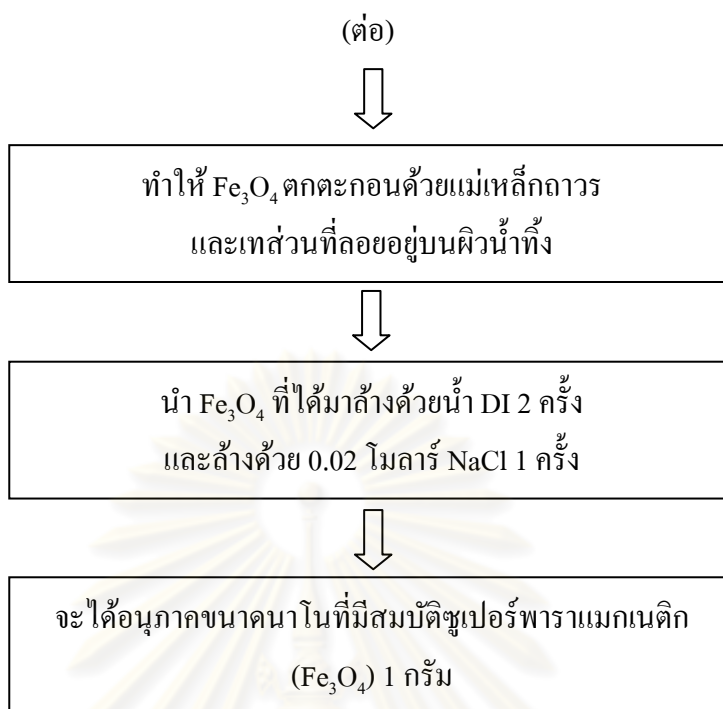
### 3.3.1.1 การเตรียมอนุภาคขนาดนาโนที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

#### (Superparamagnetic nanoparticles)

การเตรียมด้วยวิธี Co - precipitation เป็นการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ร่วมกัน ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง จะทำให้เกิดเป็น  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  โดยมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งใช้อัตราส่วนโมล  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  เท่ากับ 1:2 และต้องมีการควบคุมให้อยู่สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมอย่างละเอียด (Kim และคณะ, 2006; Liu, Ma และคณะ, 2004; Liu, Xing และคณะ, 2004; Ma, Guan และ Liu, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

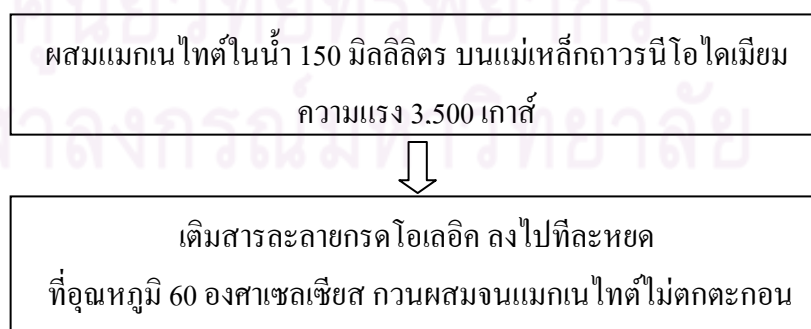


รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมอนุภาคขนาดนาโนที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก



รูปที่ 3.3 (ต่อ) แผนภาพขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนที่มีสมบัติ  
ซูเปอร์พาราแมกเนติก

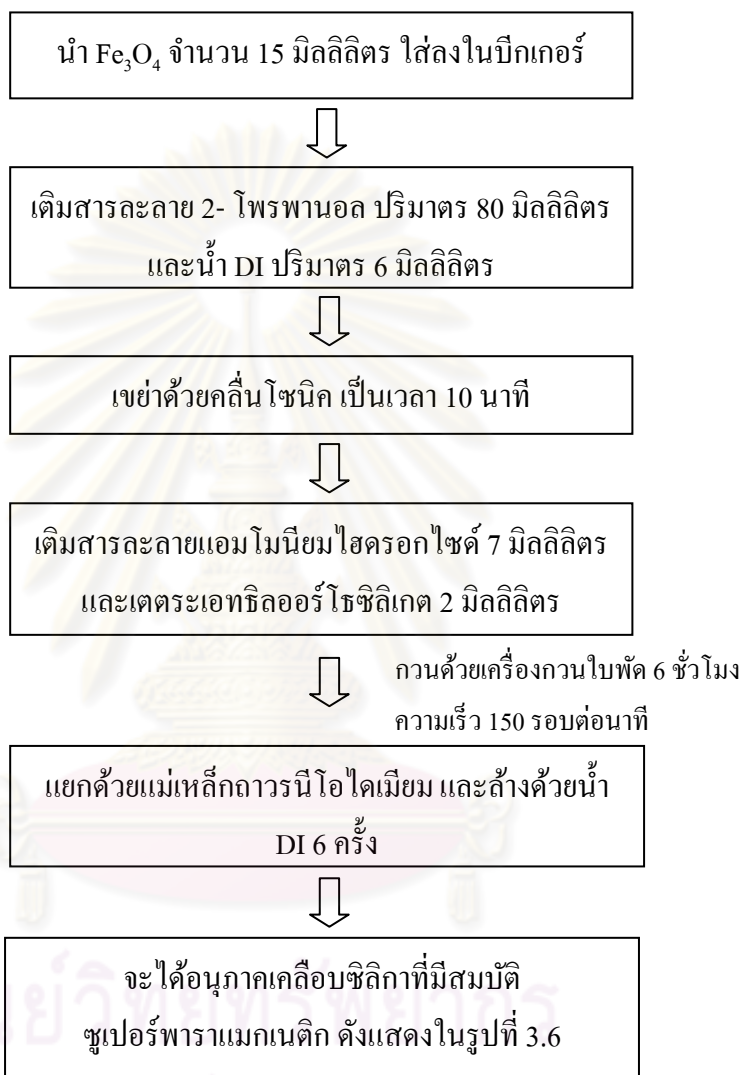
เนื่องจากแมกเนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ที่เตรียมได้จากวิธีการข้างต้นจะเกิดการรวมตัวกันได้ง่าย จึงต้องมีการเติมสารละลายกรดไขมัน (Oleic acid) เตรียมได้โดยเติมกรดไขมัน 3 มิลลิลิตร ลงในอะซิโตน 30 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 40 หยด ซึ่งมีขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



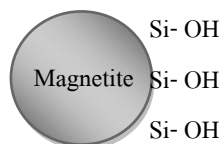
รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการป้องกันการรวมตัวของอนุภาคแมกเนไทต์

### 3.3.1.2 การเตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic Silica Coated Particles; SCP)

ทำการเคลือบอนุภาคแมกเนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ด้วยซิลิกา ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

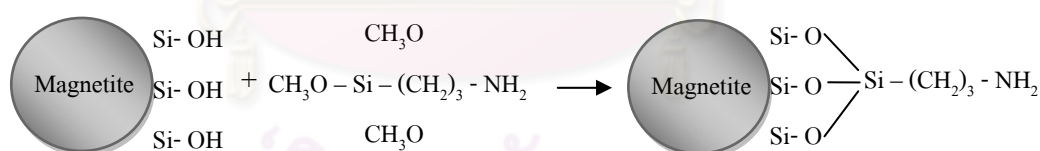


รูปที่ 3.6 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่ซิลานอล)

### 3.3.1.3 การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่ผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic Amino-silane Silica Coated Particle; A-SCP) (Liu, Ma และคณะ, 2004)

การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่ผิวอนุภาคซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. ชั่งอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่เตรียมได้ จำนวน 0.5 กรัม เติมน้ำ 25 มิลลิลิตร
2. เติม 2.5 มิลลิลิตรของ 3-Aminopropyltriethoxysilane ในเมทานอล 250 มิลลิลิตร
3. ผสมด้วยคลื่นโซนิค 30 นาที
4. เติม Glycerol 150 มิลลิลิตร
5. นำสารผสมไปใส่ใน Three-necked flask ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วกวนด้วยเครื่องกวนใบพัด
6. ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 85-90 องศาเซลเซียส เข้าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
7. ล้างด้วยน้ำ DI 3 ครั้ง และสารละลายเมทานอล 2 ครั้ง
8. ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะสุญญากาศ

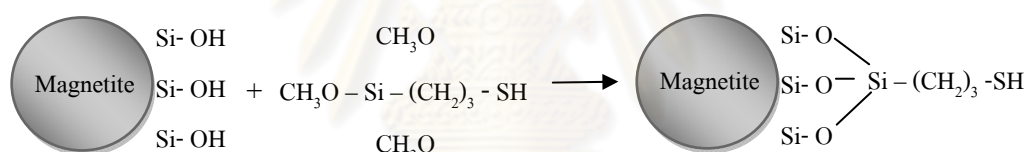


รูปที่ 3.7 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่อะมิโน)

### 3.3.1.4 การต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตที่ผิวอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic mercapto-silane silica coated particle; M-SCP) (ดัดแปลงจาก Liu, Ma และคณะ, 2004)

การต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตที่ผิวอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. ชั่งอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่เตรียมได้ จำนวน 0.5 กรัม เติมน้ำ 25 มิลลิลิตร
2. เติม 2.5 มิลลิลิตร ของ 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane ใน เมทานอล 250 มิลลิลิตร
3. ผสมด้วยคลื่นโซนิค 30 นาที
4. เติม Glycerol 150 มิลลิลิตร
5. นำสารผสมไปใส่ใน Three-necked flask ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้ว กวนด้วยเครื่องกวนใบพัด
6. ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 85-90 องศาเซลเซียส เข้าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
7. ล้างด้วยน้ำ DI 3 ครั้ง และสารละลายเมทานอล 2 ครั้ง
8. ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 3.8 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่เมอร์แคปโต)

### 3.3.1.5 การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอัลคิลที่ผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic silica alkyl-silane particles; OD-SCP)

(ดัดแปลงจาก Ma และคณะ, 2003)

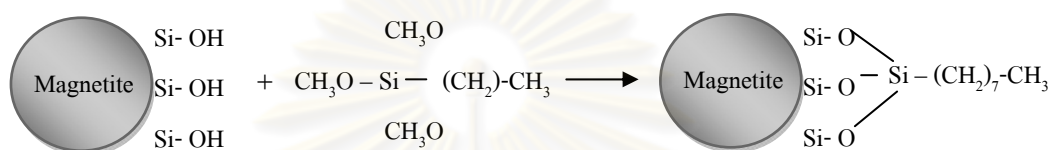
การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอัลคิลที่ผิวอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. ชั่งอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่เตรียมได้ จำนวน 0.5 กรัม นำมาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และอบต่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. นำอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ที่เตรียมได้



จากข้อ 1) มาผสมกับ สารละลายที่ผสมระหว่าง 0.5 กรัมของ n -Octyldimethylchlorosilane ใน โทลูอิน 30 มิลลิลิตร

3. กวนผสมที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมการระเหยโดยใช้อุปกรณ์เครื่องกลั่นแบบซอกเลต (Soxhlet) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. กรองแยกตัวกลางดูดซับออก และล้างด้วยโทลูอินหยาบๆ อีกครั้ง
5. นำแยกตัวกลางดูดซับไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสประมาณ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.9 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (หมู่อัลคิล)

### 3.3.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก แต่ละชนิด

การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนข้างต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของตัวกลางดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ / วิธีการวิเคราะห์
พื้นที่ผิว	BET Isotherm
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	Fourier transform infrared (FT-IR)
ปริมาณธาตุองค์ประกอบ ไนโตรเจนและซัลเฟอร์	Elemental Analysis
ประจุบนพื้นผิว	Acid-base titration
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)

#### 3.3.2.1 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว

ทำการหาพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจนโดยหาพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการของ BET

### 3.3.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR)

### 3.3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis)

(Punyapalukul, 2004)

#### 1) การหาปริมาณซัลเฟอร์

ปริมาณซัลเฟอร์บนพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่ต่อติดด้วยหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต ใช้วิธีการวัดปริมาณซัลเฟอร์โดยใช้เครื่อง ICP-AES ซึ่งมีวิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยการย่อยอนุภาคด้วยเครื่องย่อยแบบไมโครเวฟ (Microwave digestion and Extraction System) โดยใช้ตัวกลางดูดซับ 0.05 กรัม ผสมกรดไนตริกเข้มข้น 65 % 7 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 % 1 มิลลิลิตรทำการย่อยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ให้ได้ 50 มิลลิลิตร นำไปวัดปริมาณซัลเฟอร์โดยใช้เครื่อง ICP-AES

#### 2) การหาปริมาณไนโตรเจน

ปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่ต่อติดด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน วิเคราะห์โดยใช้การดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) โดยทำการย่อยตัวกลางดูดซับด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ ) ในสถานะที่เป็นค่างในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ซึ่งมีวิธีการเตรียมสารเคมีดังนี้

- สารละลายผสมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัมละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร แล้วจึงเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 3 กรัม ซึ่งสารละลายที่เตรียมได้นี้ต้องทำการเตรียมใหม่ทุกครั้ง

- สารละลายสารโพแทสเซียมไนเตรทเข้มข้น (0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อมิลลิลิตร) สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน เตรียมโดยใช้สารโพแทสเซียมไนเตรทอบแห้ง 0.722 กรัมละลายในน้ำ DI 1,000 มิลลิลิตร

- กรดไฮโดรคลอริก (1+500) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตรผสมในน้ำ DI 500 มิลลิลิตร

- กรดไฮโดรคลอริก (1+16) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตรผสมในน้ำ DI 16 มิลลิลิตร

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวกลางดูดซับ 50 มิลลิกรัม ใส่ในขวดแก้วทนความร้อนสำหรับใส่เครื่องนิ่งฆ่าเชื้อ จากนั้นใส่น้ำ DI 50 มิลลิตร และสารละลายผสมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิตร นำไปเข้าเครื่องนิ่งฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วกรองแยกตัวกลางดูดซับออก

2. นำน้ำตัวอย่าง 25 มิลลิตร ผสมด้วยกรดไฮโดรคลอริก (1+16) 5 มิลลิตร เพื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 2-3 และทำการปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิตรด้วยน้ำ DI จากนั้นทำการวัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ในน้ำด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร โดยใช้ Blank ที่เตรียมจากกรดไฮโดรคลอริก (1+500) 5 มิลลิตร ที่ปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ให้ได้ 50 มิลลิตร

3. กราฟมาตรฐานไนโตรเจนสามารถเตรียมได้จากการนำสารละลายโพแทสเซียมไนเตรทเข้มข้น 10 มิลลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิตรด้วยน้ำ DI ซึ่งจะได้สารละลายที่มีไนโตรเจนเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อมิลลิตร โดยการเตรียมกราฟมาตรฐานจะใช้ 1-15 มิลลิตรของสารละลายไนโตรเจนที่เตรียมได้ ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก (1+500) 5 มิลลิตร และทำการปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิตรด้วยน้ำ DI และวัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร ซึ่งกราฟมาตรฐานไนโตรเจนได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และการดูดกลืนแสง (UV-absorbance) โดยค่าไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$TN \text{ (mg/g)} = [a \times (60/25)] / b \quad \dots(3.1)$$

โดยที่

a = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม)

b = ปริมาณตัวกลางดูดซับ (กรัม)

**3.3.2.4 การวัดหาปริมาณประจุบนพื้นผิว** (Schulthess และคณะ, 1986 และ Al-Ghouti และคณะ, 2003 อ้างถึงใน Punyapalakul, 2004)

ทำการวัดปริมาณประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ใช้วิธีการไทเทรต ด้วยกรดและเบส มีวิธีการดังนี้

1. นำตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ชนิดละ 0.01 กรัม และเติมน้ำ DI ปริมาตร 10 มิลลิตรใส่ขวดรูปชมพู่

2. ปรับความเข้มข้นประจุของสารผสม โดยใช้สารละลายกรด ไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3. เจือจางสารผสมให้มีปริมาตร 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

4. ปรับค่า Ionic strength ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

5. นำสารผสมที่ได้ไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$

องศาเซลเซียส

6. นำส่วนใสไปวัดพีเอช

7. คำนวณหาปริมาณประจุบนพื้นผิวได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ประจุบนพื้นผิว} = [(\text{HCl})_{\text{add}} - (\text{NaOH})_{\text{add}} - (\text{H}^+) + (\text{OH}^-)] \times 96500 / \text{weight} \quad \dots(3.2)$$

### 3.3.2.5 การศึกษาลักษณะพื้นผิว

ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัว ของตัวกลางคอลลอยด์อนุภาค ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 - 25,000 เท่า

### 3.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท (PFOA และ PFOS)

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสาร PFOA และ PFOS ด้วยการวิเคราะห์ค่า สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำ (Total Organic Carbon) ด้วยเครื่อง TOC Analyzer โดยการแปลงค่า TOC ที่ได้เป็นความเข้มข้นสาร PFOA และ PFOS ด้วยการสร้างกราฟมาตรฐาน ความสัมพันธ์ของค่า TOC และความเข้มข้นสาร PFOA และ PFOS ต่อการวิเคราะห์แต่ละครั้ง

3.3.4 การศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ของ อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

1. เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก 0.1 กรัม เติมสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตรในขวด โพลีโพรพิลีนปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2. ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม Ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

3. นำสารละลายไปกวนผสมด้วยเครื่องกวนใบพัด ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างครั้งละ 20 มิลลิลิตร ตามเวลาที่กำหนด (5, 15, 30, 60, 180 นาที และ 5, 10, 24, 30 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ)

4. กรองแยกตัวคูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่เหลืออยู่ในสารละลาย ด้วยเครื่อง TOC Analyzer

5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวกลางคูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เป็นอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต และหมู่ฟังก์ชันอัลคิล และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การคูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ของตัวกลางคูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- เวลา - ชนิดของตัวกลางคูดซับ - ชนิดของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท	- 5, 10, 20, 30, 60, 120 นาที 6, 12 และ 24 ชั่วโมง - SCP, A-SCP, M-SCP, OD-SCP และ PAC - PFOA, PFOS
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท - ปริมาณตัวกลางคูดซับต่อน้ำเสียสังเคราะห์ - พีเอช - Ionic strength - อุณหภูมิ	- 100 มิลลิกรัมต่อลิตร - 0.1 กรัม ต่อ 300 มิลลิลิตร - พีเอช 7 (ควบคุมด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์) - 0.01 โมลต่อลิตร - $25 \pm 2$ องศาเซลเซียส
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่เหลืออยู่	- วิธี TOC Analyzer



### 3.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ไอโซเทอร์มการดูดซับ)

1. เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก 0.01 กรัม เติมสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทความเข้มข้น 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และใส่ลงในขวดขนาด 60 มิลลิลิตร

2. ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม Ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเชิงกลที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับซึ่งใช้ข้อมูลจากข้อ 3.3.4

4. กรองแยกตัวดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่เหลืออยู่ในสารละลาย ด้วยเครื่อง TOC Analyzer เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับ จากสมการ

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad \dots(3.3)$$

โดยที่	q	= ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$C_0$	= ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$C_e$	= ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	m	= ปริมาณตัวกลางดูดซับ (กรัม)
	V	= ปริมาตรสารละลาย (ลิตร)

5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวกลางดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เป็นอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต และหมู่ฟังก์ชันอัลคิล และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท - ชนิดของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท - ชนิดของตัวกลางดูดซับ	- 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร - PFOA , PFOS - SCP, A-SCP, M-SCP, OD-SCP และ PAC
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ปริมาณตัวกลางดูดซับต่อน้ำเสียดังเคราะห์ - พีเอช - Ionic strength - อุณหภูมิ - เวลา	- 0.01 กรัม - พีเอช 7 (ควบคุมด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์) - 0.01 โมลต่อลิตร - 25±2 องศาเซลเซียส - เวลาที่สมดุลจากข้อ 3.3.4
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่เหลืออยู่	- วิธี TOC Analyzer

**3.3.6 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง**

1. เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก 0.01 กรัม เติมสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิตร และใส่ลงในขวดขนาด 60 มิลลิตร

2. ควบคุมพีเอชของสารละลายให้ เท่ากับ 5 และ 9 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม Ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเชิงกลที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับซึ่งใช้ข้อมูลจากข้อ 3.3.4

4. กรองแยกตัวดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่เหลืออยู่ในสารละลาย ด้วยเครื่อง TOC Analyzer เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับ จากสมการที่ 3.3

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวกลางดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เป็นอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต และหมู่ฟังก์ชันอัลคิล และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช</li> <li>- ชนิดของตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ชนิดของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท</li> <li>- ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 และ 9 (ควบคุมพีเอชด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์)</li> <li>- SCP, A-SCP, M-SCP, OD-SCP และ PAC</li> <li>- PFOA, PFOS</li> <li>- 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณตัวกลางดูดซับ ต่อ น้ำเสียดังเคราะห์</li> <li>- Ionic strength</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- เวลา</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0.01 กรัม</li> <li>- 0.01 โมลต่อลิตร</li> <li>- 25±2 องศาเซลเซียส</li> <li>- เวลาที่สมดุลจากข้อ 3.3.4</li> </ul>
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่เหลืออยู่</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วิธี TOC Analyzer</li> </ul>

### 3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด

#### 3.3.7.1 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

1. เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ชนิดชอบน้ำ (SCP) ปริมาณ 0.2 กรัม ลงในน้ำเสียดังเคราะห์ 0.1 ลิตร
2. ทดลองที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 12 โดยที่พีเอช 4, 5, 7, 9 ควบคุมพีเอชด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และที่พีเอช 2, 3 และ 12 ควบคุมด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และควบคุมค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
3. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาทีและทำการตกตะกอนโดยแรงแม่เหล็ก โดยควบคุมความแรงของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 3,500 เกาส์ ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส
4. วัดความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำเป็นอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP)

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ชนิดของตัวกลางดูดซับ	- SCP, M-SCP
- พีเอช	- 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 12
- เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- 0, 30 และ 60 นาที
- ปริมาณของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด	- 0.2 กรัม

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- Ionic strength	- 0.01 โมลต่อลิตร
- อุณหภูมิ	- 25±2 องศาเซลเซียส
- เวลาปั่นกววน	- 5 นาที
- ความแรงของสนามแม่เหล็ก	- 3,500 เกาส์
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น

3.3.7.2 ผลของปริมาณของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

1. เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ชนิดชอบน้ำ (SCP) 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 กรัม ในน้ำ DI 0.1 ลิตร
2. ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยใช้ค่าพีเอชที่มีการตกตะกอนความขุ่นดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.1 และควบคุม Ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
3. ปั่นกววนที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาทีและทำการตกตะกอนโดยแรงแม่เหล็ก โดยควบคุมความแรงของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 3,500 เกาส์ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส
4. วัดความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ เป็นอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP)

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ปริมาณของตัวกลางดูดซับ	- 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 กรัม
- ชนิดของตัวกลางดูดซับ	- SCP, M-SCP
- เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- 0, 30 และ 60 นาที



ตารางที่ 3.6 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์-พาราแมกเนติกต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- พีเอช	- จากการทดลองที่ 3.3.7.1
- Ionic strength	- 0.01 โมลต่อลิตร
- อุณหภูมิ	- 25±2 องศาเซลเซียส
- เวลาปั่นกววน	- 5 นาที
- ความแรงของสนามแม่เหล็ก	- 3,500 เกาส์
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น

### 3.3.7.3 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก เมื่อมีสาร PFOS

- เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ชนิดชอบน้ำ (SCP) โดยใช้ปริมาณที่มีการตกตะกอนดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสาร PFOS เข้มข้น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.1 ลิตร
- ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยใช้ค่าพีเอชที่ทำให้อนุภาคเคลือบซิลิกา ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการตกตะกอนดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.1 และควบคุม Ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- ปั่นกววนที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และทำการตกตะกอนโดยแรงแม่เหล็ก โดยควบคุมความแรงของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 3,500 เกาส์ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส
- วัดความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที
- ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ เป็น อนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP)

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก เมื่อมีสาร PFOS

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ชนิดของตัวกลางดูดซับ - ปริมาณ PFOS - เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- SCP, M-SCP - 100 , 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร - 0, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ปริมาณของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด - พีเอช - Ionic strength - อุณหภูมิ - เวลาปั่นกววน	- จากการทดลองที่ 3.3.7.2 - จากการทดลอง 3.3.7.1 - 0.01 โมลต่อลิตร - 25±2 องศาเซลเซียส - 5 นาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น

### 3.3.7.4 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์

1. เตรียมน้ำเสียความขุ่น 100 NTU โดยใช้อนุภาคความขุ่นจากดินขาว ปริมาตร 0.1 ลิตร
2. ทดลองที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 12 โดยที่พีเอช 4, 5, 7, 9 ควบคุมพีเอชด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และที่พีเอช 2, 3 และ 12 ควบคุมด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และควบคุมค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
3. ปั่นกววนที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส
4. วัดค่าความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของน้ำเสียดังเคราะห์

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- พีเอช - เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 12 - 0, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความขุ่น - Ionic strength - อุณหภูมิ - เวลาปั่นกววน	- 100 NTU - 0.01 โมลต่อลิตร - 25±2 องศาเซลเซียส - 5 นาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น

3.3.7.5 ผลของปริมาณอนุภาคความขุ่นต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของน้ำเสียดังเคราะห์

1. เตรียมน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีความขุ่นจากดินขาวที่มีความขุ่น 100, 200, 300 และ 400 NTU ปริมาตร 0.1 ลิตร
2. ควบคุมพีเอชของน้ำเสียดังเคราะห์ โดยใช้ค่าพีเอชที่มีการตกตะกอนความขุ่นดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.4 โดยควบคุมค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
3. ปั่นกววนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส
4. วัดค่าความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคความขุ่นต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความขุ่น - เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- 100, 200, 300 และ 400 NTU - 0, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- พีเอช - Ionic strength - อุณหภูมิ - เวลาปั่นกววน	- จากการทดลอง 3.3.7.4 - 0.01 โมลต่อลิตร - 25±2 องศาเซลเซียส - 5 นาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น

**3.3.7.6 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นน้ำเสียสังเคราะห์ ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก**

- เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ (SCP) โดยใช้ปริมาณที่มีการตกตะกอนดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ 0.1 ลิตร ที่มีความขุ่นที่ตกตะกอนดีที่สุดจากการทดลอง 3.3.7.5
- ทดลองที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 12 โดยที่พีเอช 4, 5, 7, 9 ควบคุมพีเอชด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และที่พีเอช 2, 3 และ 12 ควบคุมด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และควบคุมค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- ปั่นกววนที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และทำการตกตะกอนโดยแรงแม่เหล็ก โดยควบคุมความแรงของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 3,500 เกาส์ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส
- วัดค่าความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที
- ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ เป็น อนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP)

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นน้ำเสียสังเคราะห์ ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ชนิดของตัวกลางดูดซับ - พีเอช - เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- SCP, M-SCP - 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 12 - 0, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความขุ่น - ปริมาณของตัวกลางดูดซับ แต่ละชนิด - Ionic strength - อุณหภูมิ - เวลาปั่นกววน - ความแรงของสนามแม่เหล็ก	- จากการทดลองที่ 3.3.7.5 - จากการทดลองที่ 3.3.7.2 - 0.01 โมลต่อลิตร - 25±2 องศาเซลเซียส - 5 นาที - 3,500 เกาส์
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น

### 3.3.7.7 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียที่มีสาร PFOS

1. เตรียมอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ (SCP) โดยใช้ปริมาณที่มีการตกตะกอนดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ 0.1 ลิตร ที่มีความขุ่นที่ตกตะกอนดีที่สุดจากการทดลอง 3.3.7.5 ปริมาณ PFOS ที่ทำให้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกตกตะกอนดีที่สุด จากข้อ 3.3.7.3

2. ทดลองที่พีเอช ที่ทำให้การตกตะกอนความขุ่นดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.7.6 และควบคุมค่า Ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

3. ปั่นกววนที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาทีและทำการตกตะกอนโดยแรงแม่เหล็ก โดยควบคุมความแรงของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 3,500 เกาส์ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส

4. วัดค่าความขุ่นที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที

5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ เป็น อนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP)

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียที่มีสาร PFOS

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ชนิดของตัวกลางดูดซับ - เวลาในการตกตะกอนความขุ่น	- SCP, M-SCP - 0, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความขุ่น - ปริมาณของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด - พีเอช - ปริมาณ PFOS - Ionic strength - อุณหภูมิ - เวลาปั่นกววน - ความแรงของสนามแม่เหล็ก	- จากการทดลองที่ 3.3.7.5 - จากการทดลองที่ 3.3.7.2 - จากการทดลองที่ 3.3.7.6 - จากการทดลองที่ 3.3.7.3 - 0.01 โมลต่อลิตร - 25±2 องศาเซลเซียส - 5 นาที - 3,500 เกาส์
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความขุ่นที่ในน้ำ	- เครื่องวัดความขุ่น



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง และตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก 4 ชนิด คือ อนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (SCP) และอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ 3 ชนิด คือ หมู่อะมิโน (A-SCP) หมู่เมอร์แคปโต (M-SCP) และหมู่อัลคิล (OD-SCP) โดยวิเคราะห์ถึงลักษณะสมบัติของตัวกลางดูดซับ ดังนี้

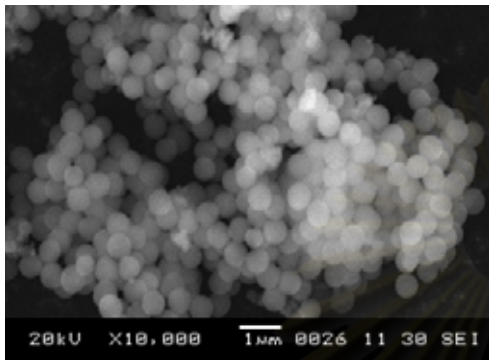
- พื้นที่ผิว โดยใช้การดูดซับก๊าซใน โตรเจนบนพื้นผิวและคำนวณด้วยสมการ BET
- ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยใช้ฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-IR) เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวทั้งหมด
- ประจุบนพื้นผิว โดยใช้วิธีการไทเทรต กรด-เบส
- ปริมาณของธาตุใน โตรเจนและซัลเฟอร์ เพื่อหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเมอร์แคปโต ที่อยู่บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับจะนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลของการทดสอบจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น ความชอบน้ำ ประจุบนพื้นผิว และพื้นที่ผิว ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

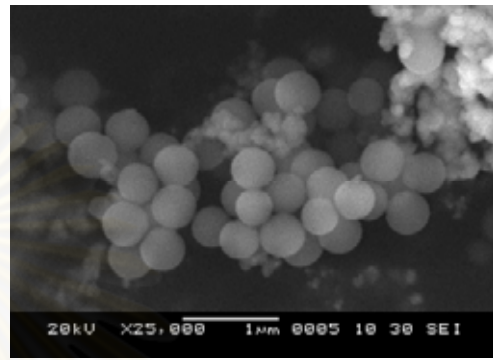
##### 4.1.1 ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว

ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และอนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคมีลักษณะกลม ขนาดเท่ากันสม่ำเสมอ

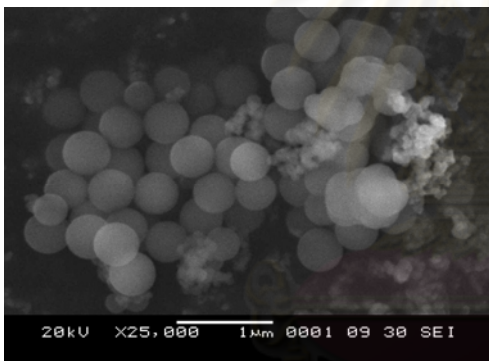
มีการกระจายตัวดี และพบว่า การต่อติดหมู่ฟังก์ชันส่งผลต่อขนาดอนุภาคและลักษณะพื้นผิวของอนุภาค โดยที่ขนาดอนุภาคของ SCP, A-SCP, M-SCP และ OD-SCP โดยประมาณ เท่ากับ 428, 437, 468 และ 550 นาโนเมตรตามลำดับ ลักษณะตัวอย่างพื้นผิวของตัวกลางดูดซับชนิด SCP, A-SCP, M-SCP, OD-SCP และ PAC แสดงดังรูปที่ 4.1



SCP  
(กำลังขยาย 10,000 เท่า)



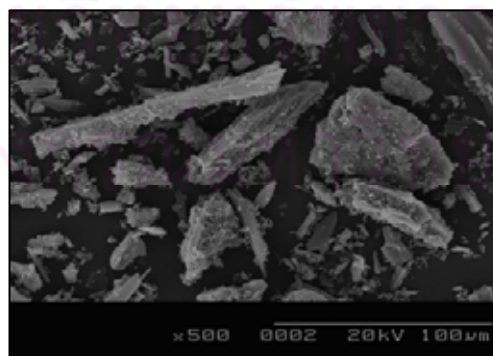
A-SCP  
(กำลังขยาย 25,000 เท่า)



M-SCP  
(กำลังขยาย 25,000 เท่า)



OD-SCP  
(กำลังขยาย 20,000 เท่า)



PAC  
(กำลังขยาย 500 เท่า)

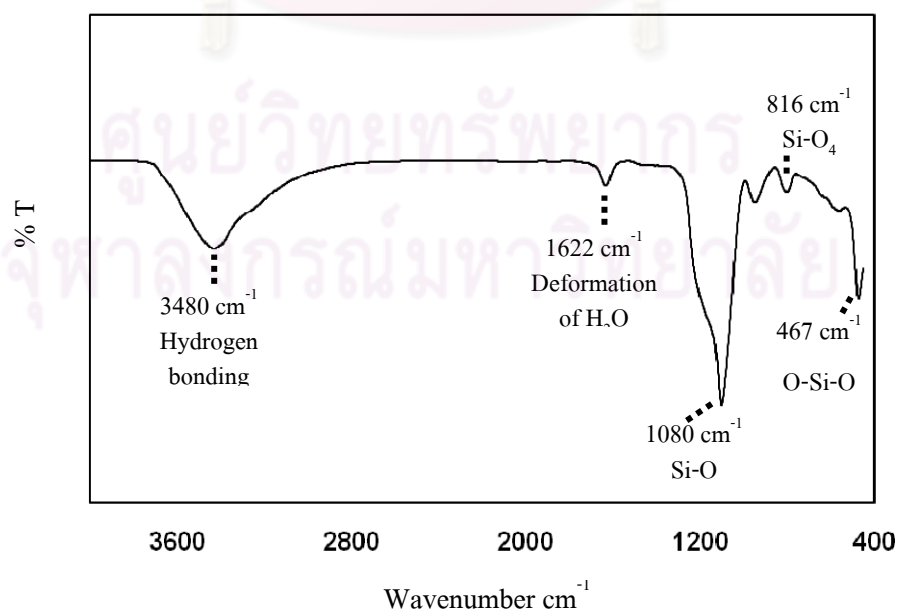
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

#### 4.1.2 พื้นที่ผิว

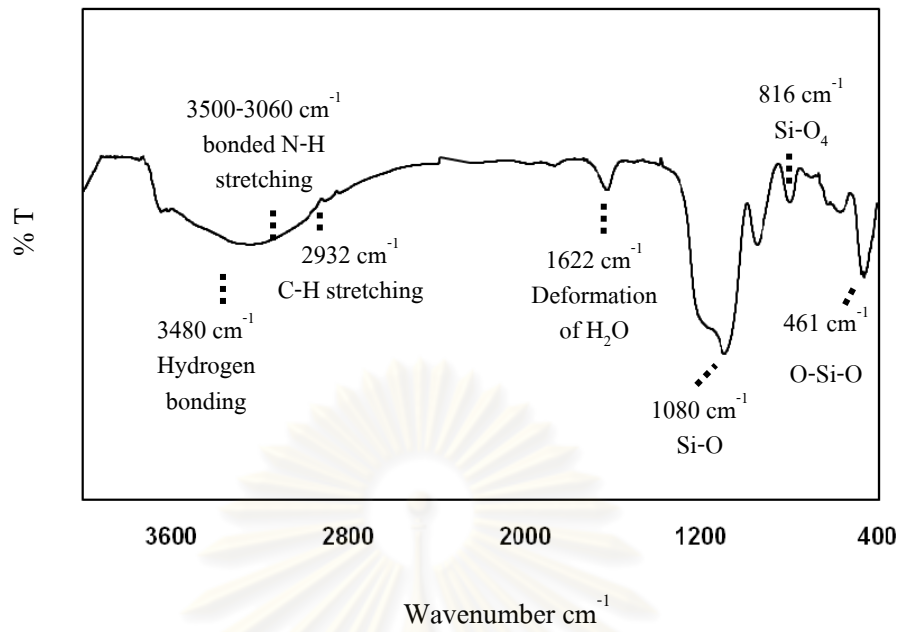
การหาพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจน คำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการของ BET พบว่าค่าพื้นที่ผิวของ SCP, A-SCP, M-SCP และ OD-SCP มีค่าเท่ากับ 58.01, 56.84, 67.13 และ 62.66 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวกับถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่มีพื้นที่ผิวรวมสูงมาก คือ 980.46 ตารางเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวภายนอกเท่ากับ 59.41 ตารางเมตรต่อกรัม โดยจากการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด จะเห็นว่ากรที่ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีพื้นที่ผิวมากน่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารได้ดีกว่าตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าการดูดซับมลสารเกิดขึ้นได้เฉพาะกับพื้นผิวภายนอกหรือกรณีที่มีมลสารมีขนาดใหญ่จนไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ได้ ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผงน่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.1.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

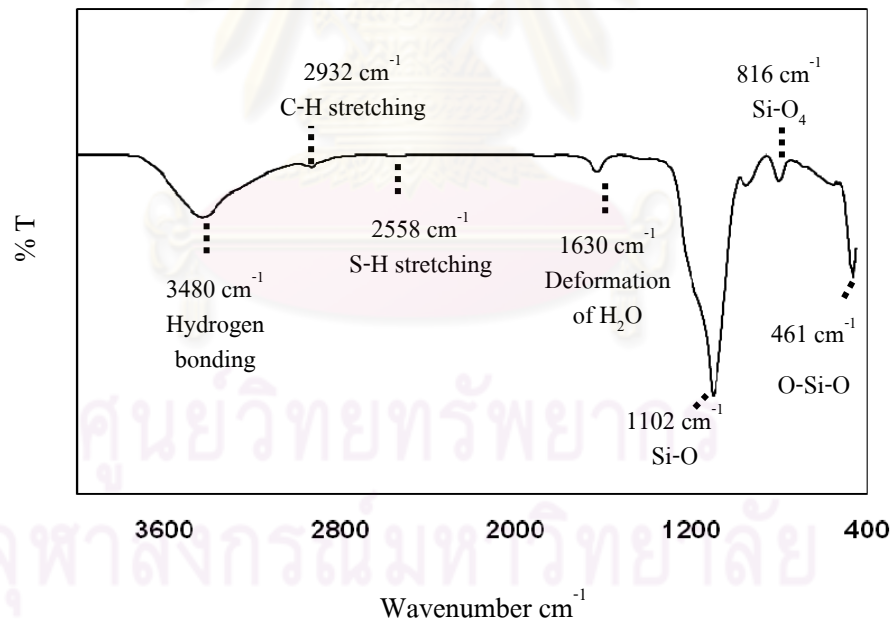
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-IR) เพื่อยืนยันชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นแต่ละชนิด โดย FT-IR Spectra ของ SCP, A-SCP, M-SCP และ OD-SCP แสดงดังรูปที่ 4.2-4.5



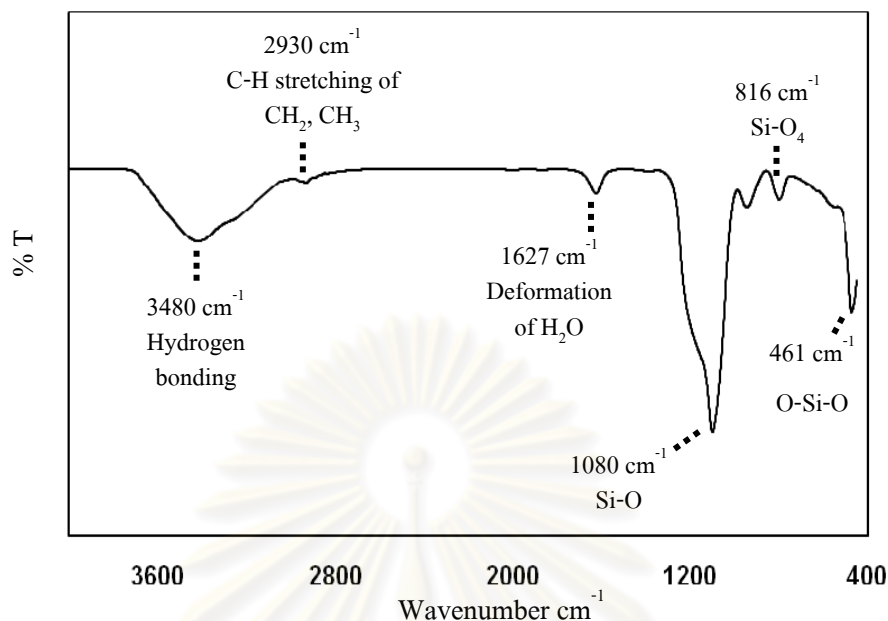
รูปที่ 4.2 FT-IR Spectra ของตัวกลางดูดซับ SCP



รูปที่ 4.3 FT-IR Spectra ของตัวกลางดูดซับ A-SCP



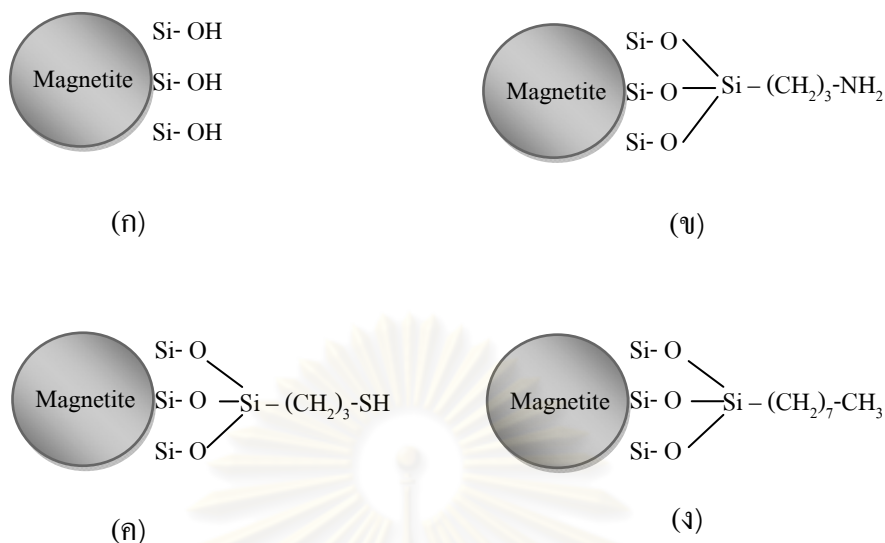
รูปที่ 4.4 FT-IR Spectra ของตัวกลางดูดซับ M-SCP



รูปที่ 4.5 FT-IR Spectra ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP

จากรูปที่ 4.2 FT-IR Spectra ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดจะมีค่า Peak ของ O-H อย่างชัดเจนที่ Wavenumber 3400-3500  $\text{cm}^{-1}$  แสดงว่ามีหมู่ฟังก์ชันซิลานอลอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ โดยเฉพาะ SCP ที่มีค่า Peak ของ O-H มากที่สุด สำหรับตัวกลางดูดซับที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะปรากฏค่า Peak ของ C-H stretching ที่ Wavenumber น้อยกว่า 3000  $\text{cm}^{-1}$  นอกจากนี้ A-SCP ปรากฏค่า Peak ของ N-H stretching ที่ Wavenumber 3500-3060  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนอยู่บนพื้นผิวดูดซับ อย่างไรก็ตาม การยืนยันการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (-SH) ยังไม่ชัดเจน เนื่องจากค่า Peak ของ S-H stretching มีน้อยมากที่ Wavenumber 2558  $\text{cm}^{-1}$

แบบจำลอง โครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.6



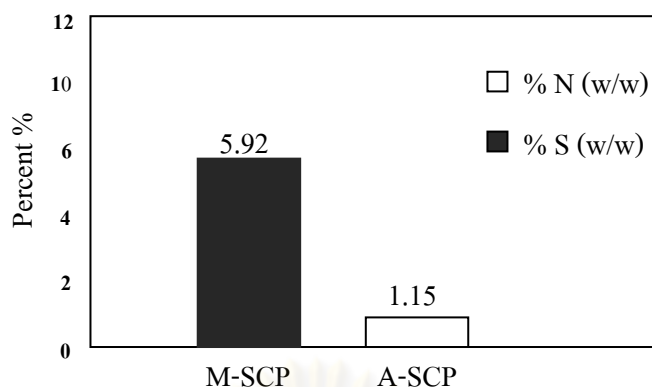
รูปที่ 4.6 หมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด

(ก) SCP (ข) A-SCP (ค) M-SCP (ง) OD-SCP

#### 4.1.4 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis)

เพื่อยืนยันข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย FT-IR การหาปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ สามารถระบุถึงปริมาณของหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (-NH<sub>2</sub>) บนตัวกลางดูดซับ A-SCP และหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (-SH) บนตัวกลางดูดซับ M-SCP โดยปริมาณไนโตรเจนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้การดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ซึ่งทำการย่อยตัวกลางดูดซับโดยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) ในสภาวะที่เป็นค้ำในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ใช้วิธีการย่อยด้วยกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในตู้ย่อยแบบไมโครเวฟ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ด้วยเครื่อง ICP-AES ปริมาณไนโตรเจนของ A-SCP เท่ากับ 1.15 % และปริมาณซัลเฟอร์ของ M-SCP เท่ากับ 5.92 % ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ยืนยันการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่เมอร์แคปโตจาก FT-IR ได้นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณปริมาณของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่พบว่า A-SCP และ M-SCP มีความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเท่ากับ 0.0014 และ 0.0028 โมลต่อตารางเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7

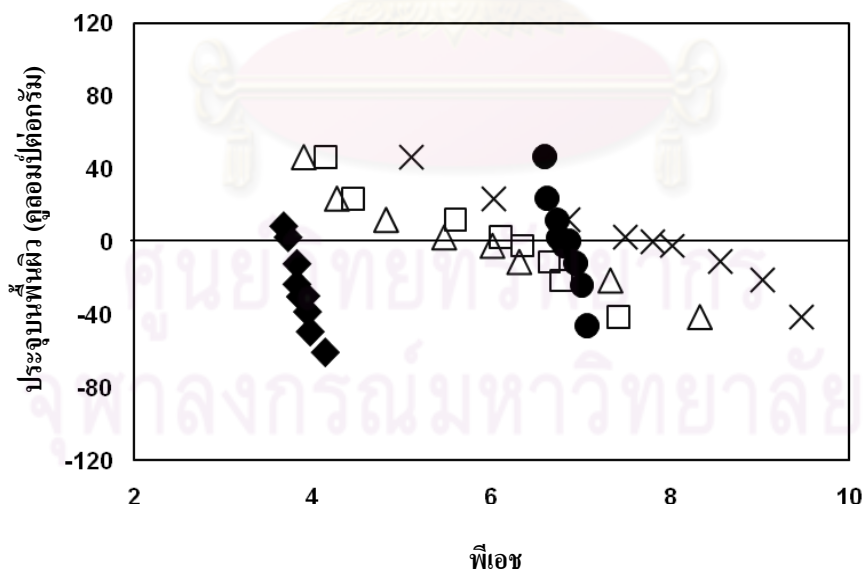




รูปที่ 4.7 ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์บนตัวกลางดูดซับ A-SCP และ M-SCP

#### 4.1.5 ประจุบนพื้นผิว

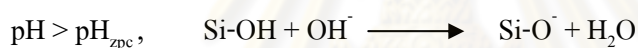
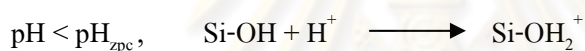
ประจุบนพื้นผิวบนตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง หาได้จากวิธีการไทเทรตกรด-เบส โดยควบคุมความแรงของประจุ (Ionic strength) ที่ 0.01 โมลต่อลิตร จากการทดลองสามารถระบุช่วงค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ) ค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ของ SCP, A-SCP, M-SCP, OD-SCP และ PAC เท่ากับ 6.2, 7-8, 5.6, 3.8 และ 6.8 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8



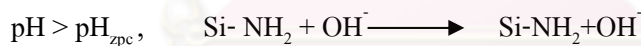
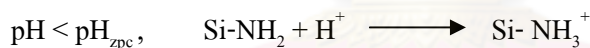
รูปที่ 4.8 ประจุบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

เมื่อพิจารณาตัวกลางดูดซับชนิด SCP จะพบว่า มีหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน (ให้หรือรับโปรตอน) ทำให้ประจุบนพื้นผิวมีความแตกต่างกันที่พีเอชต่างๆ ส่วนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะทำให้ค่า  $pH_{zpc}$  ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของหมู่ฟังก์ชัน เนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำของหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วย 3-Aminopropyltriethoxysilane (A-SCP) ทำให้ค่า  $pH_{zpc}$  มีค่าอยู่ในช่วงพีเอชที่สูงขึ้นประมาณ 7-8 ในขณะที่การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอัลคิลด้วย n-Octyldimethylchlorosilane (OD-SCP) จะทำให้ค่า  $pH_{zpc}$  ลดลง โดย  $pH_{zpc}$  จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง คือ มีค่าคงที่ที่ประมาณ 3.8 ส่วนการต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตด้วย 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane (M-SCP) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวของ SCP เล็กน้อย โดยมีค่า  $pH_{zpc}$  ประมาณ 5.6 ปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวแสดงได้ดังสมการ ดังนี้

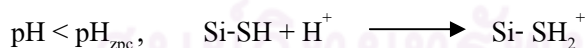
- 1) หมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Punyapalukul, 2004)



- 2) หมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Huang และ Chen, 2009)



- 3) หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต



#### 4.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

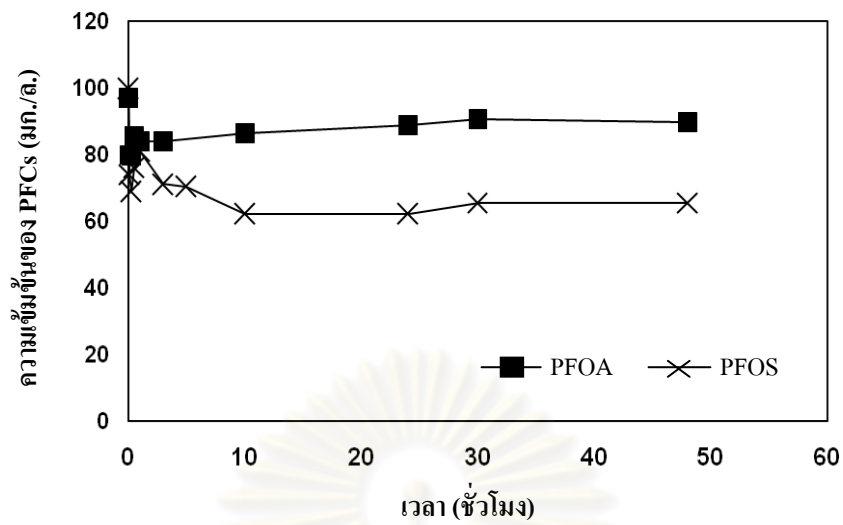
สามารถสรุปลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

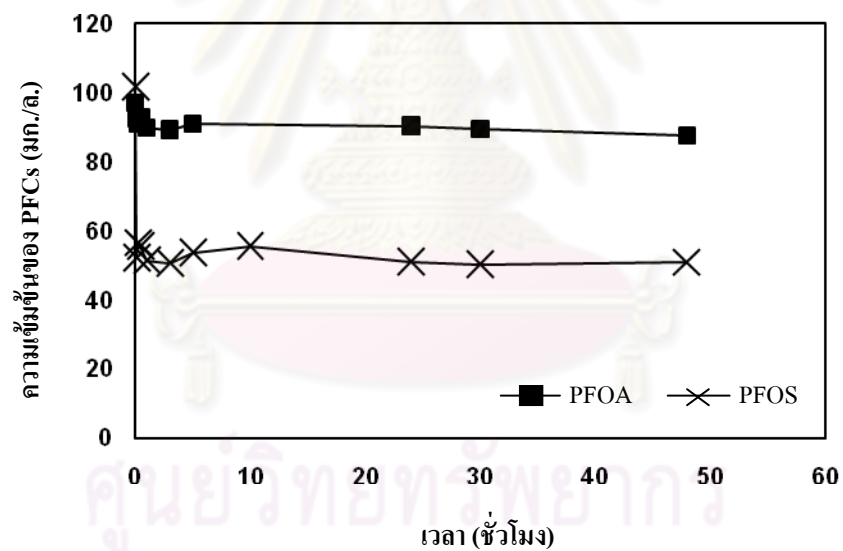
ตัวกลางดูดซับ	ขนาดอนุภาค (nm)	พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )	pH <sub>zpc</sub>	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	สมบัติบนพื้นผิว	% S บนพื้นผิว	% N บนพื้นผิว
SCP	428	58.01	6.2	ซิลานอล (Si-OH)	ชอบน้ำ	-	-
A-SCP	437	56.84	7-8	อะมิโน (-NH <sub>2</sub> ) ซิลานอล (Si-OH)	ชอบน้ำ	-	1.15 % (0.0014 mol/m <sup>2</sup> )
M-SCP	468	67.13	5.6	เมอร์แคปโต (-SH) ซิลานอล (Si-OH)	ไม่ชอบน้ำ ชอบน้ำ	5.92 % (0.0028 mol/m <sup>2</sup> )	-
OD-SCP	550	62.66	3.8	อัลคิล (-CH) ซิลานอล (Si-OH)	ไม่ชอบน้ำ ชอบน้ำ	-	-
PAC	36,540 (ขนาดรูพรุน= 1.9)	980 (พื้นที่ผิวภายนอก = 59)	6.8	คาร์บอกซิล ฟีนิลและอื่นๆ	ไม่ชอบน้ำ	-	-

#### 4.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

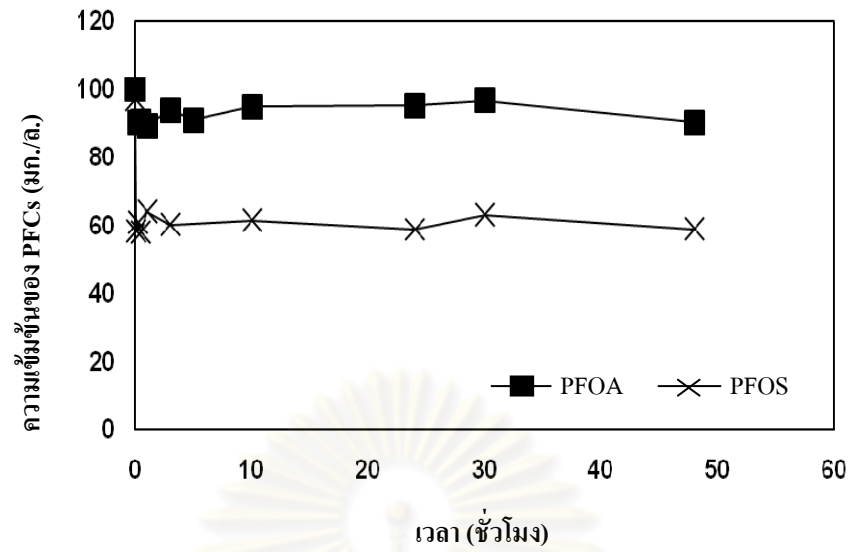
การศึกษากลจลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ด้วยตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง เพื่อหาเวลาที่สมดุลการดูดซับ โดยในการทดลองได้กำหนดความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตัวกลางดูดซับ SCP, A-SCP, M-SCP และ OD-SCP ส่วนตัวกลางดูดซับ PAC ได้กำหนดความเข้มข้นของสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้สามารถแสดงแนวโน้มการดูดซับอย่างชัดเจน เนื่องจากที่ความเข้มข้นสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท 100 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นจนถึงจุดสมดุลการดูดซับได้ โดยในการศึกษาได้ทำการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 0 – 48 ชั่วโมง ในการทดลองแบบทีละเทได้ผลการศึกษากลจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.9 – 4.13



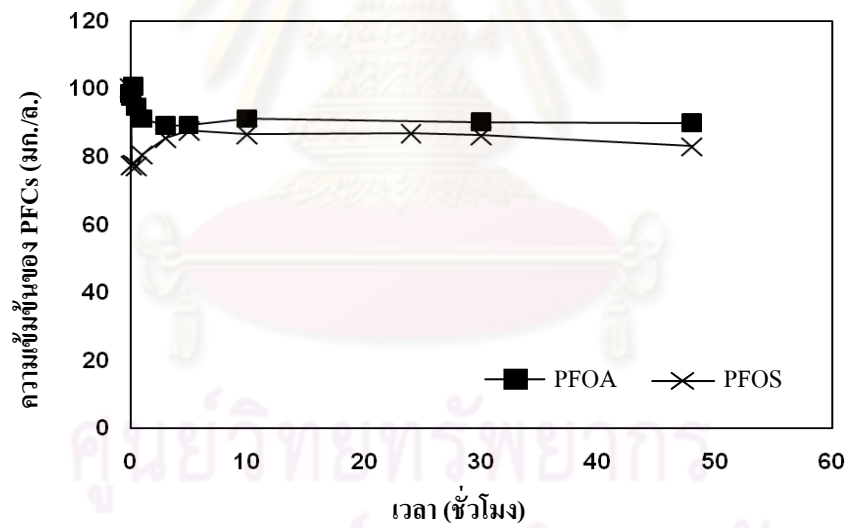
รูปที่ 4.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)



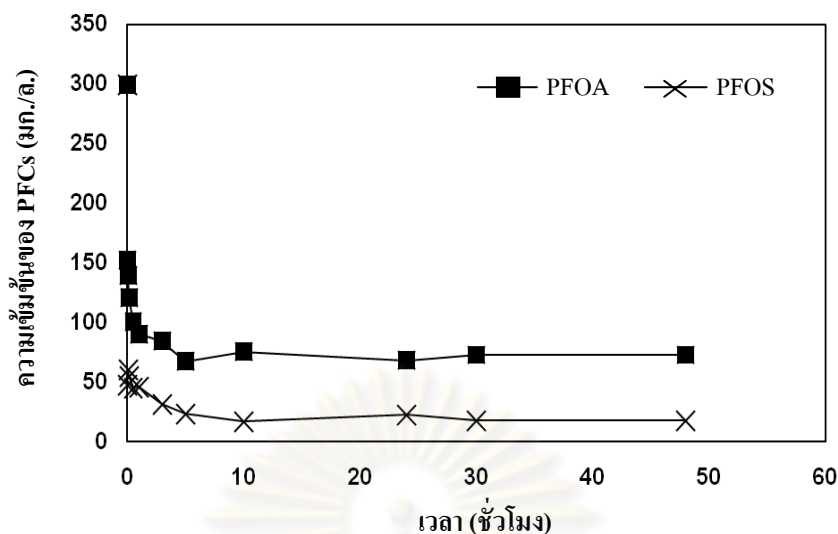
รูปที่ 4.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ A-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)



รูปที่ 4.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเปอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ M-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)



รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเปอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ OD-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)



รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับ PAC (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากการทดลองพบว่า เวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ทั้งสองชนิดของ SCP ทุกชนิดใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง 30 นาทีแรก ส่วน PAC จะมีเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับใกล้เคียงกับตัวกลางดูดซับ SCP โดยตัวกลางดูดซับทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับ PFOS ได้สูงกว่า PFOA ซึ่งเกิดจากขนาดโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่กว่าของ PFOS และความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกันของสาร ทั้งสองชนิดเป็นปัจจัยสำคัญ โดยความสามารถในการละลายน้ำของ PFOS และ PFOA เท่ากับ 570 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,400 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำให้ PFOS สามารถใช้ตัวกลางดูดซับแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่า PFOA นอกจากนี้หมู่ซัลโฟเนต ( $-\text{SO}_3^-$ ) ของ PFOS และหมู่คาร์บอกซิล ( $-\text{COO}^-$ ) ของ PFOA ยังสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันซิลานอล อะมิโน และเมอร์แคปโต ของ SCP, A-SCP และ M-SCP ได้ตามลำดับ ทำให้ตัวกลางดูดซับทั้งสามชนิดสามารถดูดซับ PFOS ได้มากกว่า OD-SCP ที่ไม่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้อย่างชัดเจน ส่วน PAC ซึ่งเป็นตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวหลายชนิด และมีพื้นที่ผิวมากจึงทำให้มีอัตราการดูดซับสารทั้งสองชนิดสูง โดยเมื่อพิจารณาเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ใกล้เคียงกับตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแสดงให้เห็นว่า สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของถ่านกัมมันต์และดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้ดี

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ได้มีการเลือกใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second-order model) มาอธิบายถึงอัตราเร็วของการดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2



## 1) ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \dots(4.1)$$

- เมื่อ  $k_1$  = ค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (ชั่วโมง<sup>-1</sup>)  
 $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา  
 สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ  
 (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

## 2) ปฏิกริยาอันดับสองเทียม

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \dots(4.2)$$

- เมื่อ  $k_2$  = ค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)  
 $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา  
 สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ  
 (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS และ PFOA มาสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม  $k_1$  หาได้จากความชันของเส้นตรง ค่าจุดตัดแกนตั้งมีค่าเป็น  $\ln q_e$  และเมื่อสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีค่าความชันเป็น  $\frac{1}{q_e}$  และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับสองเทียม  $k_2$  ได้จากค่าจุดตัดแกนตั้ง โดยแสดงรายละเอียดสำหรับการคำนวณดังตารางที่ ก.1 ถึงตารางที่ ก.10 ในภาคผนวก ก. นอกจากนี้สามารถหาค่าอัตราการดูดซับเริ่มต้น ได้จากสมการที่ 4.3

$$h = k_2 q_e^2 \quad \dots(4.3)$$

- เมื่อ  $h$  = อัตราการดูดซับเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม-ชั่วโมง)  
 $k_2$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)  
 $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา  
 สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ค่าคงที่ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS และ PFOA แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสาร PFOS ของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

Adsorbent	$q_e$ [exp] (mg/g)	Pseudo first-order model			Pseudo Second-order model			$h$ (mg/g-h)
		$q_e$ [cal] (mg/g)	$k_1$ (g/mg-h)	$R^2$	$q_e$ [cal] (mg/g)	$k_2$ (g/mg-h)	$R^2$	
SCP	112.97	71.43	0.251	0.6981	105.26	0.028	0.9976	312.50
A-SCP	152.40	30	0.123	0.2121	153.85	0.021	0.9996	500
M-SCP	114.95	18.98	0.117	0.1460	111.11	0.058	0.9960	714.29
OD-SCP	52.13	18.51	0.025	0.2284	48.31	0.014	0.9811	32.90
PAC	548.91	107.08	0.770	0.7763	555.56	0.016	1.0000	5000

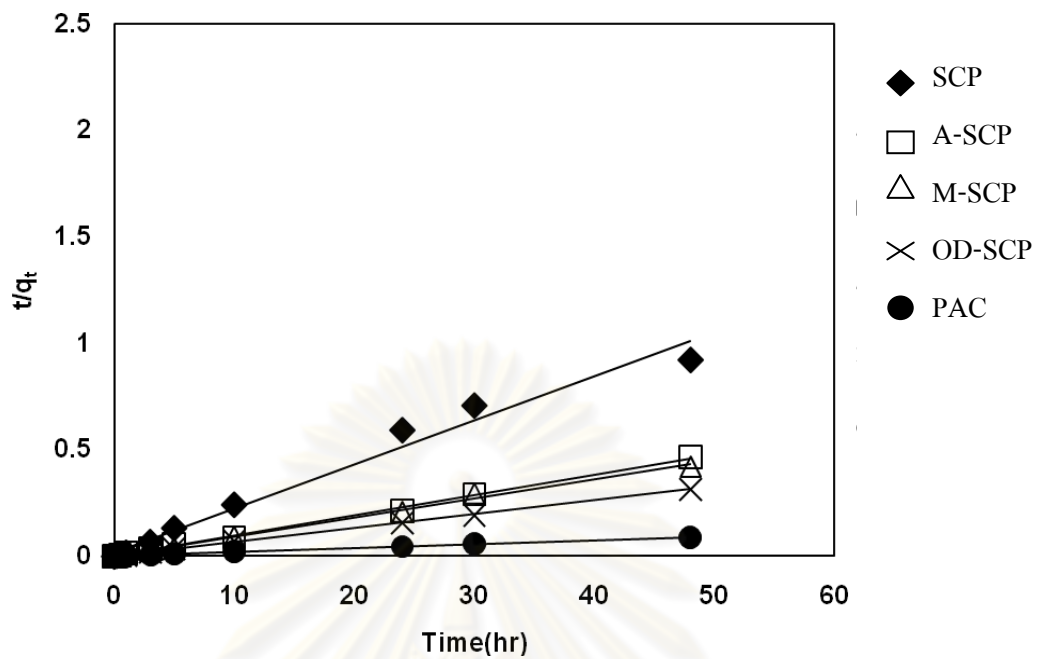
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสาร PFOA ของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

Adsorbent	$q_e$ [exp] (mg/g)	Pseudo first-order model			Pseudo Second-order model			$h$ (mg/g-h)
		$q_e$ [cal] (mg/g)	$k_1$ (g/mg-h)	$R^2$	$q_e$ [cal] (mg/g)	$k_2$ (g/mg-h)	$R^2$	
SCP	24.50	6.42	0.251	0.6981	24.50	0.036	0.9859	16.08
A-SCP	20.04	5.22	0.123	0.2121	26.18	0.008	0.8987	5.19
M-SCP	29.01	16.84	0.6068	0.0042	11.06	0.039	0.9601	4.80
OD-SCP	25.04	34.03	0.572	0.5396	25.04	0.124	0.9075	81.97
PAC	458.56	89.94	0.770	0.7763	454.55	0.035	0.9999	7142.86

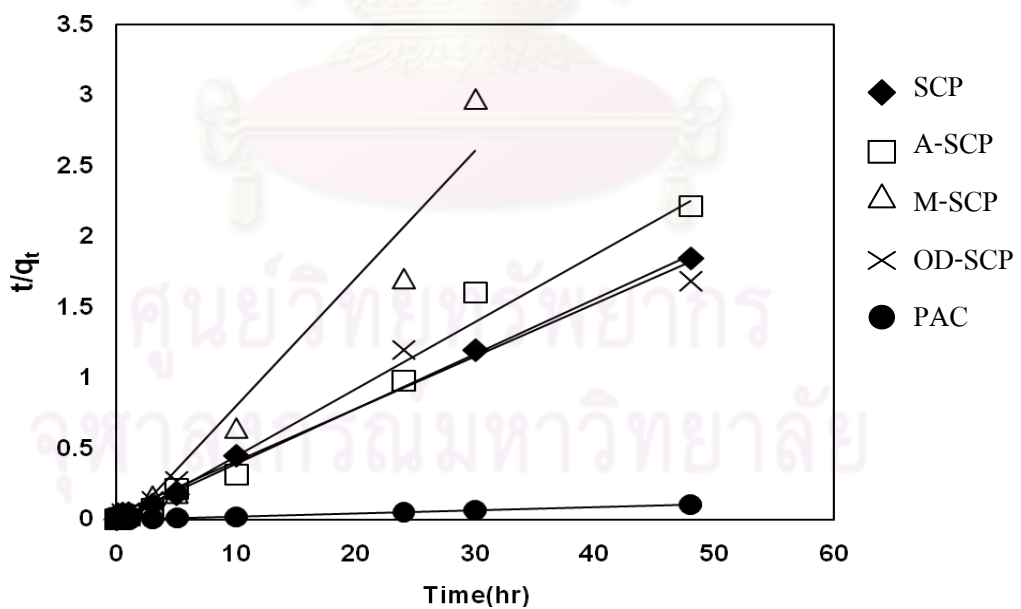
จากผลการศึกษาค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่า แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนททั้งสองชนิดได้ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่มีความเป็นเส้นตรงสูง และค่าความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนททั้งสองชนิด (PFOS และ PFOA) โดยตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง จึงมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นน่าจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับจำนวนของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ และจำนวนสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองของ Yu และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS และ PFOA โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดแกร็ด (GAC) และเรซิน (AI 400) โดยจากการศึกษา พบว่า GAC และเรซินเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับที่เวลา 168 ชั่วโมง ในขณะที่ PAC เข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับที่เวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราเร็วของการดูดซับของตัวกลางดูดซับทุกชนิดมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และพบว่า PAC และเรซินมีประสิทธิภาพการดูดซับ PFOS และ PFOA สูงที่สุดตามลำดับ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ที่ 520 และ 1,460 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

จากการคำนวณค่าอัตราการดูดซับเริ่มต้น ( $h$ ) จะเห็นได้ว่า PAC มีค่าอัตราการดูดซับเริ่มต้นที่สูงกว่าตัวกลางดูดซับชนิดอื่นๆ และอัตราการดูดซับเริ่มต้นของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกของการดูดซับ PFOS มีค่ามากกว่า PFOA ทุกตัวกลางดูดซับ ยกเว้น OD-SCP ที่มีค่าอัตราการดูดซับเริ่มต้นของ PFOA สูงกว่า PFOS โดยกราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15

ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ของการดูดซับสาร PFOS โดยใช้ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง



รูปที่ 4.15 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ของการดูดซับสาร PFOA โดยใช้ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

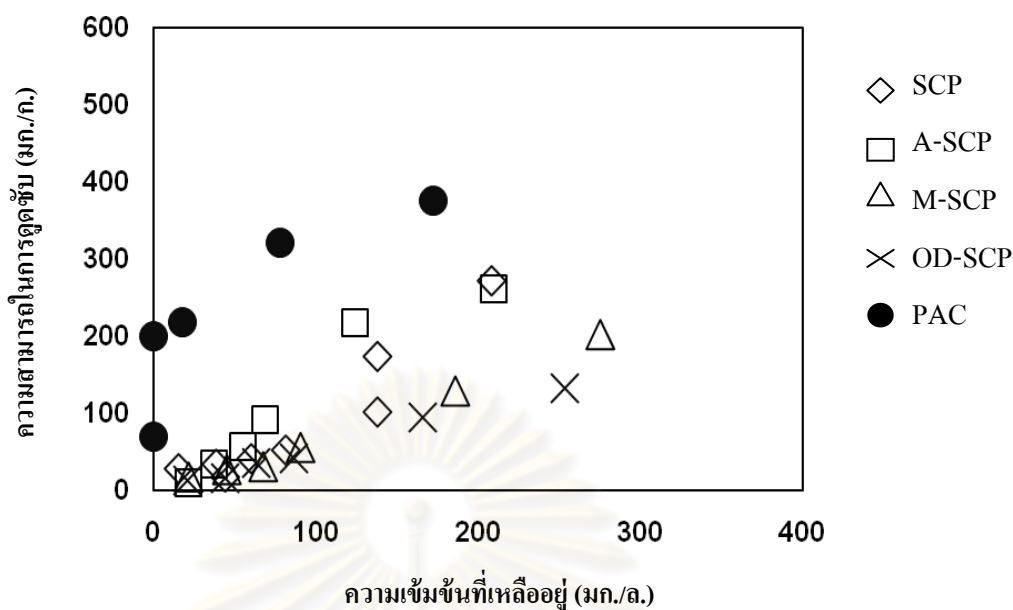
### 4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทชนิด PFOS และ PFOA ของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ (SCP, A-SCP, M-SCP และ OD-SCP) และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ที่ความเข้มข้นสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท 25-300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการดูดซับ ดังนี้คือ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ และผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับมาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ยังนำเสนอการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช มาทำการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้น

#### 4.3.1 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับที่มีต่อการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

สารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทที่มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ เป็นสารที่มีค่า pKa ต่ำ โดย PFOS และ PFOA มีค่า pKa เท่ากับ 2.5 และ -3.27 ตามลำดับ ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งก็คือส่วนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ( $-\text{COO}^-$ ) หรือซัลโฟเนต ( $-\text{SO}_3^-$ ) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) คือส่วนของสายพันธะคาร์บอนกับฟลูออรีน ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท โดยใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

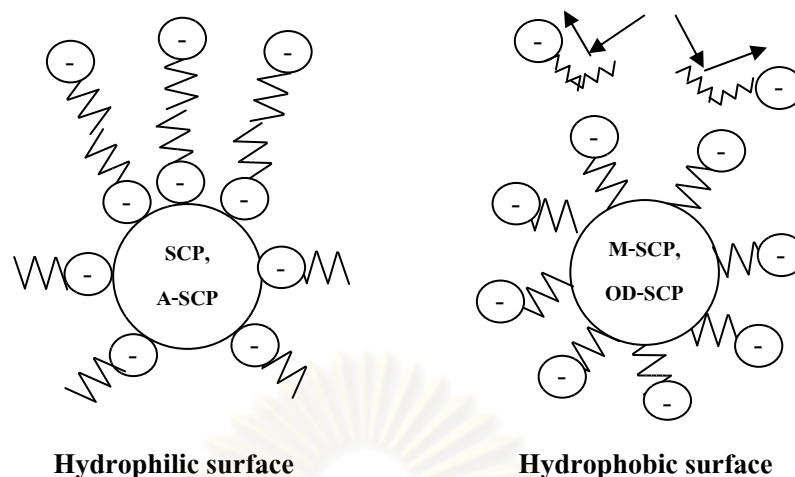
จากผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับ พบว่า PFOS ถูกดูดซับได้มากกว่า PFOA ทุกชนิดตัวกลางดูดซับ ซึ่งเป็นผลจากสมบัติการละลายน้ำของสารทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันมาก โดย PFOS และ PFOA มีค่าการละลายน้ำอยู่ที่ 570 และ 3,400 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า PFOA มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงมาก ทำให้การแยกสารชนิดนี้ออกจากน้ำเป็นไปได้ยาก ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงมีค่าต่ำกว่าการดูดซับ PFOS และพบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับสาร PFOA และ PFOS ใกล้เคียงกัน และมีความสามารถในการดูดซับสูงที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ เนื่องมาจากการมีพื้นที่ผิวมาก และยังมีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายทำให้ PFOA และ PFOS สามารถเข้าทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้หลายรูปแบบ สามารถแสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.18-4.22



รูปที่ 4.16 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 5 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากผลการทดลองศึกษาการดูดซับสาร PFOS ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 5 พบว่า ตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแบบชอบน้ำคือ A-SCP และ SCP มีความสามารถในการดูดซับ PFOS ได้ใกล้เคียงกัน โดยที่ A-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า SCP เล็กน้อย ในขณะที่ตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำคือ M-SCP และ OD-SCP มีความสามารถในการดูดซับ PFOS ได้ต่ำกว่าตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแบบชอบน้ำ โดย M-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า OD-SCP เล็กน้อย ซึ่งแรงหลักที่สำคัญในการดูดซับบนพื้นผิวที่ชอบน้ำของ SCP และ A-SCP คือพันธะไฮโดรเจน ที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) หรือหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Si-NH<sub>2</sub>) ทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลโฟเนต (-SO<sub>3</sub>) ของ PFOS ในขณะที่ตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำจะเกิดการดูดซับส่วนที่ไม่ชอบน้ำของ PFOS ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก โดยเมื่อพิจารณาการดูดซับบนพื้นผิวแบบชอบน้ำที่สามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นได้ น่าจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ SCP และ A-SCP มีความสามารถในการดูดซับสาร PFOS ได้สูงกว่า M-SCP และ OD-SCP โดยลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวแบบชอบน้ำและพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (PFOS และ PFOA) แสดงดังรูปที่ 4.17

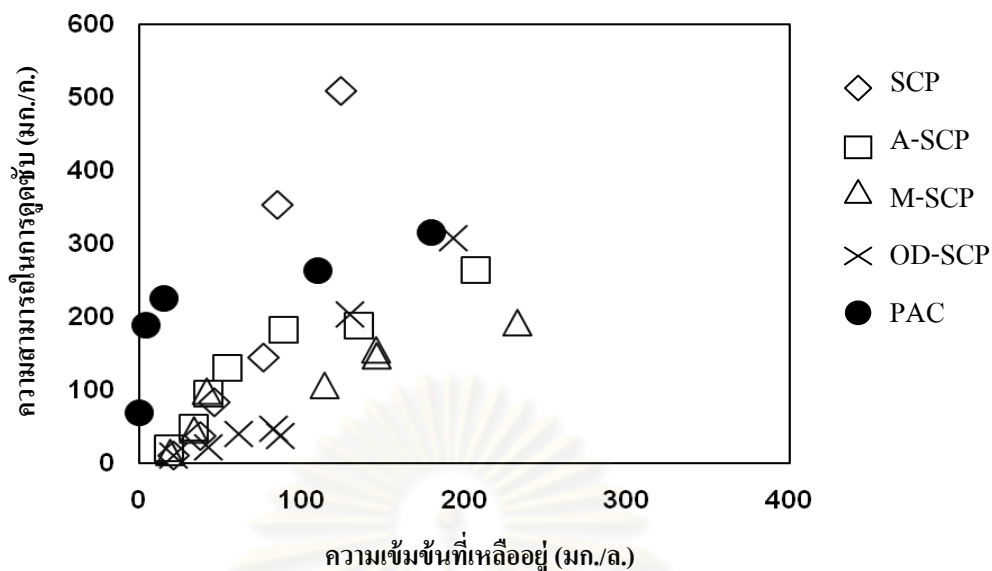




รูปที่ 4.17 ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวแบบชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของ PFOS และ PFOA บนตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ

นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 5 ความแรงประจุบวกของ A-SCP ( $\text{Si-NH}_3^+$ ) มีมากกว่า SCP ( $\text{Si-OH}_2^+$ ) ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ PFOS ของ A-SCP มีมากกว่า SCP ในขณะที่ M-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า OD-SCP เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (-SH) ของ M-SCP มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ และมีพื้นผิวที่มีประจุเป็นกลาง ในขณะที่ OD-SCP มีหมู่ฟังก์ชันที่ไม่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มีประสิทธิภาพการดูดซับ PFOS ต่ำที่สุด ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ OD-SCP จะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก นอกจากนี้ OD-SCP ยังมีประจุบนพื้นผิวเป็นลบที่จะผลักกับ PFOS ที่มีประจุลบได้อีกด้วย จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าตัวกลางดูดซับชนิดอื่น

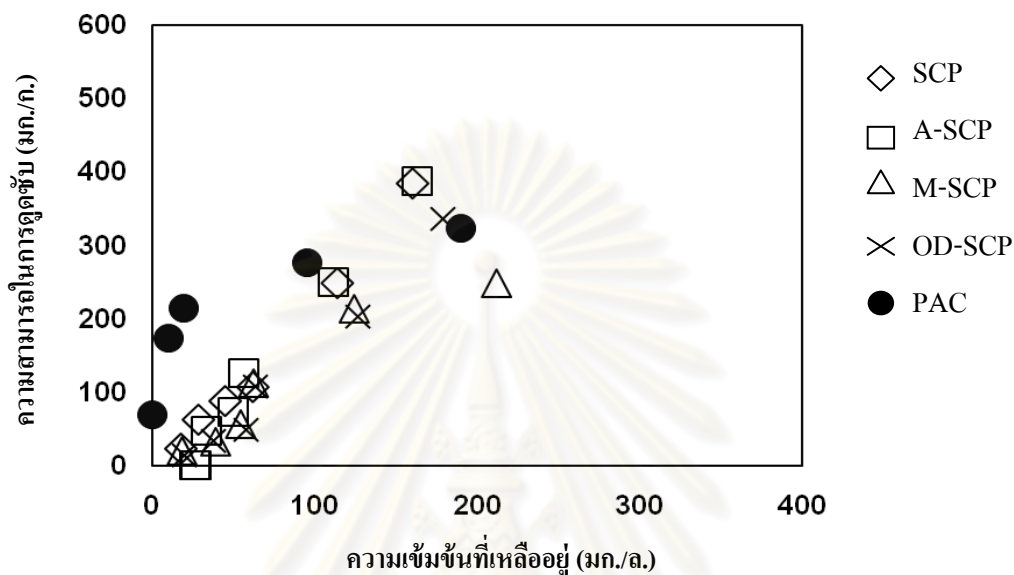
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

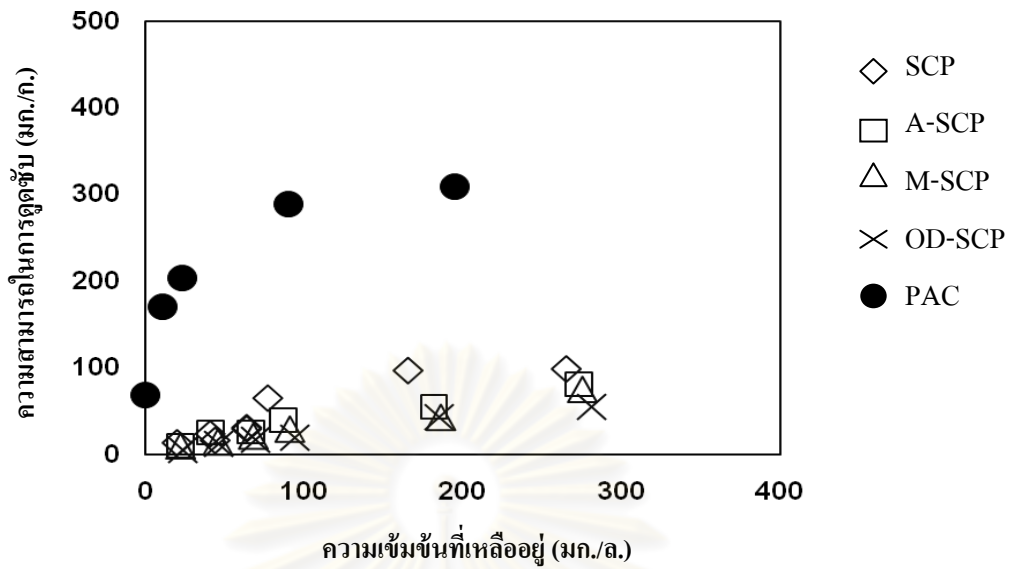
จากผลการทดลองหาความสามารถในการดูดซับสาร PFOS ที่พีเอช 7 พบว่าตัวกลางดูดซับ SCP ดูดซับสาร PFOS ได้สูงและมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่า PAC เมื่อความเข้มข้น PFOS สูงขึ้น โดยสามารถดูดซับ PFOS ได้สูงถึง 509 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ PAC มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำได้ดี โดย PAC มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 316 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นสูง (300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ประสิทธิภาพในการกำจัด PFOS ของ SCP สูงถึง 75.63 % ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด PFOS ของ PAC มีเพียง 43.14 % ความสามารถที่สูงขึ้นของ SCP น่าจะเกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิวแบบชอบน้ำที่มีสูงขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของ PFOS สูง ในขณะที่ A-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงที่ความเข้มข้นต่ำ และมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า M-SCP เล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาด้านแรงทางประจุพบว่า SCP มีประจุลบเล็กน้อย แต่ยังสามารถดูดซับสูง เนื่องจากการดูดซับบนพื้นผิวของ SCP ขึ้นอยู่กับพันธะไฮโดรเจนเป็นสำคัญ และน่าจะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นได้ดีที่พีเอช 7 ในขณะที่เมื่อพิจารณาตัวกลางดูดซับ A-SCP ที่มีพื้นผิวเป็นประจุเป็นกลางที่พีเอชในช่วงประมาณ 7-8 ทำให้โอกาสเกิดการดูดซับด้วยแรงทางประจุน้อย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนของ A-SCP ที่มีความแรงกว่า SCP แต่มีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า SCP ทั้งนี้พบว่าความแรงพันธะไฮโดรเจนไม่ได้เป็นปัจจัยที่สามารถส่งเสริมการดูดซับของ A-SCP ให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากความยาวของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่ติดบนพื้นผิวของ SCP มีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจนด้วยตัวเอง รวมถึงเกิดกับหมู่ฟังก์ชันซิลานอลที่หลงเหลืออยู่ ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ PFOS น้อยลง ส่วนตัวกลางดูดซับ OD-SCP มี

ความสามารถในการดูดซับต่ำที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นสูงความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกับ PAC ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากที่ความเข้มข้นสูง OD-SCP มีโอกาสในการเกิดการดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์มีมากขึ้น

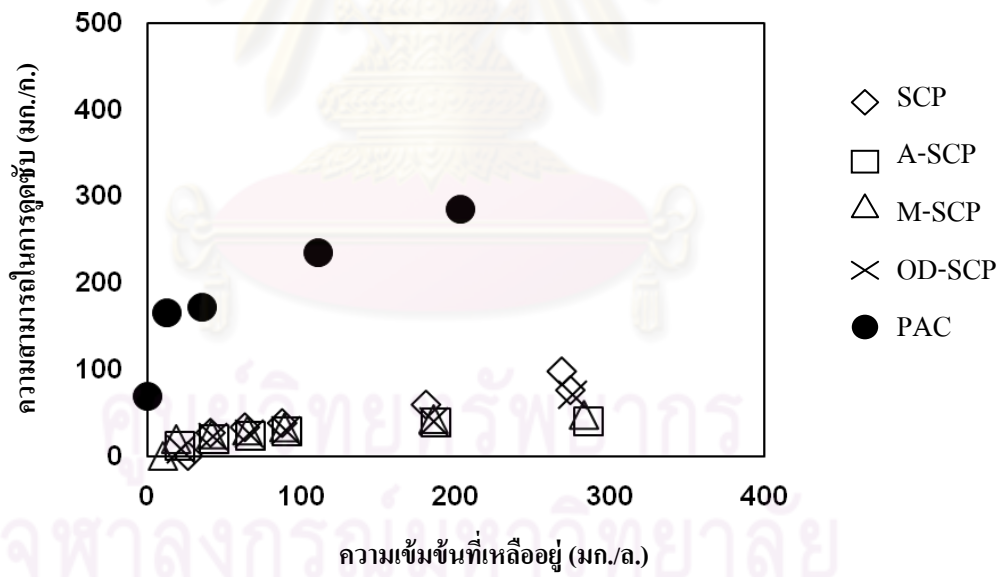


รูปที่ 4.19 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 9 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

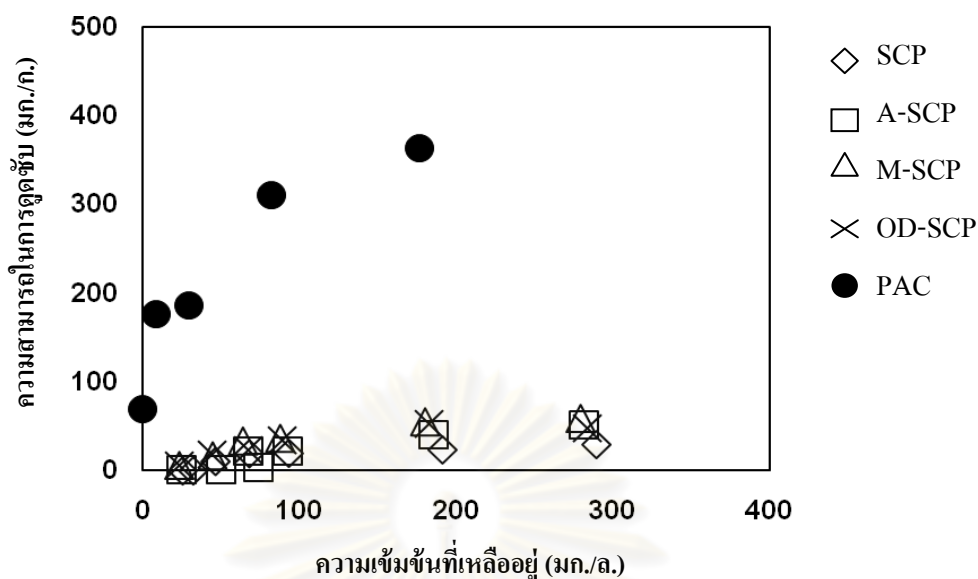
จากผลการทดลองศึกษาการดูดซับสาร PFOS ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 9 พบว่า ตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับสูงใกล้เคียงกับ PAC โดยที่ตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำคือ SCP และ A-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ คือ M-SCP และ OD-SCP และที่ความเข้มข้น PFOS มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร SCP และ A-SCP มีความสามารถในการดูดซับมากกว่า PAC โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดประมาณ 385 และ 388 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งแรงหลักที่สำคัญในการดูดซับบนพื้นผิวที่ชอบน้ำของ SCP และ A-SCP คือพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่ตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำจะเกิดการดูดซับส่วนที่ไม่ชอบน้ำของ PFOS ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกับการทดลองที่พีเอช 5 และพีเอช 7



รูปที่ 4.20 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOA (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 5 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)



รูปที่ 4.21 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOA (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 7 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)



รูปที่ 4.22 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOA (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส พีเอช 9 ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากผลการทดลองศึกษาการดูดซับสาร PFOA ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 4.20 - 4.22 พบว่าความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่พีเอช 5 (รูปที่ 4.20) หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ คือ SCP และ A-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ โดย SCP และ A-SCP มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับประมาณ 98 และ 40 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ที่การเพิ่มประจุบวกบนพื้นผิว ไม่ได้เป็นปัจจัยหลักในการส่งเสริมการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ด้วยแรงทางประจุ โดยพบว่า A-SCP ที่มีแรงทางประจุบวกมากกว่า SCP แต่มีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่า SCP และเมื่อทำการเพิ่มค่าพีเอชเป็น 7 ความสามารถในการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่ความเข้มข้นสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโอกาสในการดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์มีมากขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มประจุลบบนพื้นผิวมีผลต่อการดูดซับบนพื้นผิวแบบชอบน้ำของ SCP แสดงได้จากการเพิ่มค่าพีเอชเป็น 9 ความสามารถในการดูดซับของ SCP จะลดลงจนต่ำกว่า M-SCP และ OD-SCP ส่วน A-SCP จะมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันที่พีเอชต่างๆ และมีค่าใกล้เคียงกับ M-SCP และ OD-SCP

จากการทดลองผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ต่อการดูดซับ PFOS และ PFOA แสดงให้เห็นว่าสมบัติความชอบน้ำ (พันธะไฮโดรเจน) มีความสำคัญต่อการดูดซับ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะส่งผลต่อความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนของตัวกลางดูดซับ ซึ่งพบว่าเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปจะมีการให้หรือรับโปรตอน ( $H^+$ ) ของหมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับ โดยเมื่อพีเอชน้อยกว่า  $pH_{zpc}$  หมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะได้รับโปรตอนมากขึ้นทำให้โอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิล ( $SO_3^-$ ) ของ PFOS หรือหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ( $-COO^-$ ) ของ PFOA มีมากขึ้นด้วย ในขณะที่เมื่อพีเอชสูงขึ้นมากกว่า  $pH_{zpc}$  หมู่ฟังก์ชันของตัวกลางดูดซับจะมีการสูญเสียโปรตอน ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง อย่างไรก็ตาม โมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ก็มีโอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีเช่นกัน ทำให้ความสำคัญของพันธะไฮโดรเจนในบางกรณียังไม่แน่ชัด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยส่งเสริมต่อการดูดซับอื่นๆ เช่น การดึงดูดด้วยแรงทางประจุ และไอออนบวกในน้ำ เป็นต้น ส่วนตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ มีแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลักในการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับที่พีเอชต่างๆ จะมีความใกล้เคียงกันและจะมีความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของไอโซเทอร์ม 2 แบบ คือ สมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และสมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช โดยแสดงรายละเอียดสำหรับการคำนวณดังตารางที่ ก.11 ถึงตารางที่ ก.40 ในภาคผนวก ก. ได้ผลการดูดซับสาร PFOS ที่เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับทั้งสอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทั้งสองสมการมีค่าใกล้เคียงกัน โดย SCP, A-SCP, M-SCP และ PAC มีความสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชมากกว่า ในขณะที่ OD-SCP มีความสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า ส่วนการดูดซับสาร PFOA ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับทั้งสองพบว่า A-SCP และ OD-SCP มีความสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า ในขณะที่ SCP, M-SCP และ PAC มีความสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับสาร PFOS และ PFOA ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผงแสดงดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5



ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

Adsorbent	Langmuir			Freundlich		
	pH	$q_m$	$b$	$R^2$	$K_f$	$1/n$
SCP						
5	114.94	0.0184	0.6977	1.080	0.951	0.7361
7	39.45	0.0098	0.9321	77.607	2.222	0.9701
9	256.41	0.0052	0.9374	1.0732	1.184	0.9772
A-SCP						
5	52.91	0.0080	0.9167	6.685	1.463	0.9529
7	192.31	0.0055	0.9309	1.526	1.015	0.8864
9	277.78	0.0045	0.9373	2.248	1.343	0.9561
M-SCP						
5	178.57	0.0055	0.9043	1.211	0.966	0.9245
7	285.71	0.0027	0.9306	1.337	1.074	0.9588
9	714.29	0.0014	0.9461	1.457	1.141	0.9271
OD-SCP						
5	238.10	0.0024	0.9025	2.258	1.029	0.9633
7	166.67	0.0029	0.9934	10.710	1.488	0.9587
9	120.48	0.0055	0.9804	5.578	1.456	0.9681
PAC						
5	400.00	0.0683	0.9898	109.371	0.242	0.9961
7	277.78	0.5070	0.8476	160.583	0.126	0.9468
9	312.50	0.1194	0.9770	112.305	0.201	0.9846

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

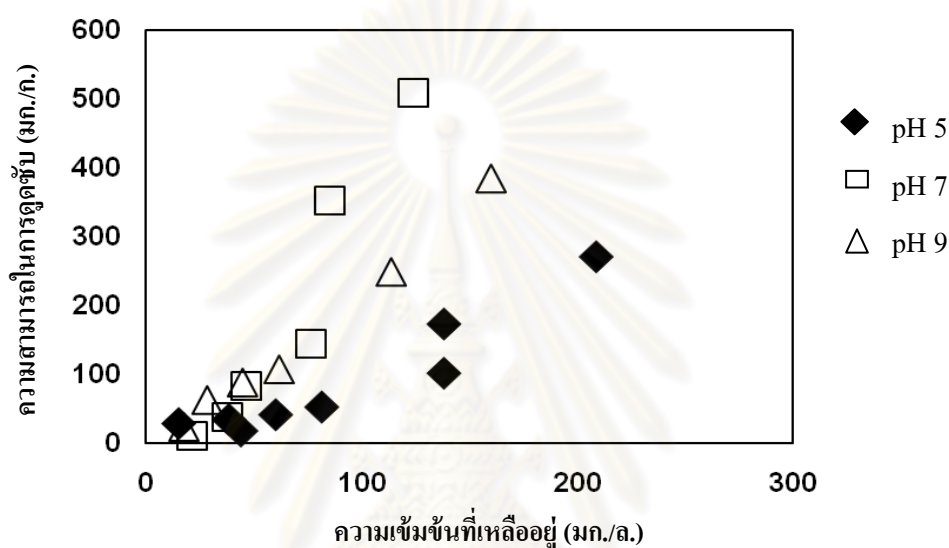
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

Adsorbent	Langmuir			Freundlich		
	pH	$q_m$	b	$R^2$	$K_f$	1/n
SCP						
5	147.06	0.0046	0.8308	1.159	0.885	0.8758
7	111.11	0.0073	0.9378	2.158	0.660	0.9627
9	46.51	0.0073	0.8641	2.229	0.462	0.8235
A-SCP						
5	434.78	0.0011	0.9460	1.036	0.782	0.9398
7	51.55	0.0134	0.9979	2.871	0.489	0.9583
9	80.00	0.0050	0.8784	1.298	0.649	0.9510
M-SCP						
5	81.30	0.0056	0.9636	1.418	0.809	0.9808
7	44.44	0.0391	0.9264	7.311	0.334	0.9981
9	88.50	0.0030	0.9394	1.722	0.880	0.8694
OD-SCP						
5	153.85	0.0013	0.9779	4.243	0.980	0.9825
7	909.09	0.0004	0.9312	1.087	0.767	0.9098
9	84.75	0.0028	0.9228	1.854	0.856	0.8663
PAC						
5	312.50	0.1029	0.9600	102.825	0.216	0.9778
7	250.00	0.1338	0.6711	92.087	0.203	0.9085
9	303.03	0.1454	0.6356	92.790	0.259	0.8823

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.2 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท

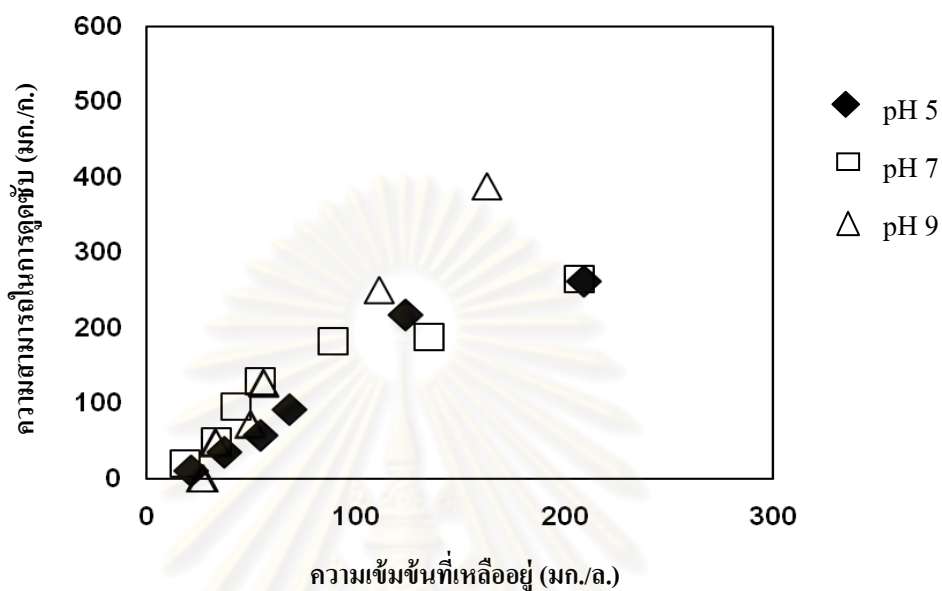
การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง โดยการทดลองหาความสามารถในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทชนิด PFOS และ PFOA ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.23 - 4.32



รูปที่ 4.23 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

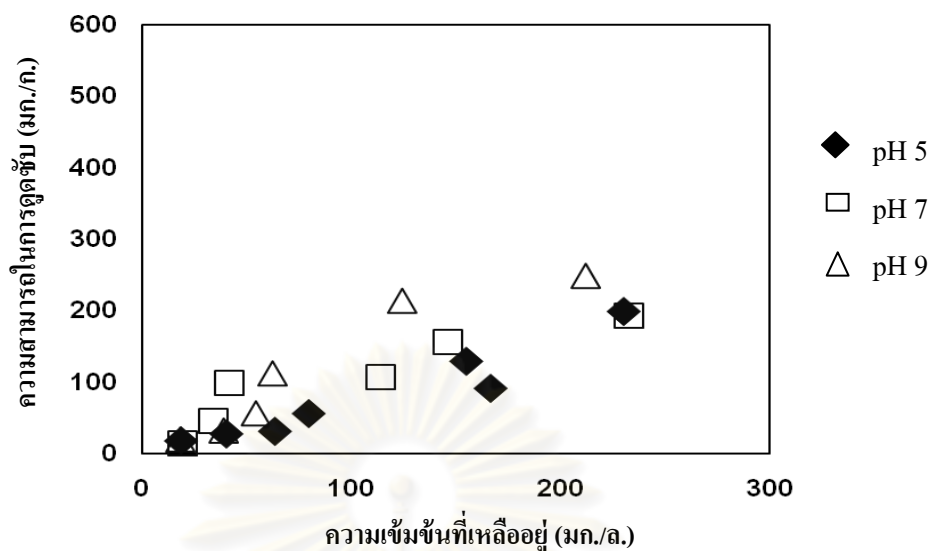
เมื่อพิจารณาการดูดซับ PFOS ด้วยตัวกลางดูดซับ SCP พบว่า ที่พีเอช 7 SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาคือพีเอช 9 และพีเอช 5 โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 573, 441 และ 271 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุ เพราะในช่วงพีเอช 7 ประจุบนพื้นผิว SCP มีประจุลบไม่สามารถเกิดการดึงดูดด้วยแรงทางประจุกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบอย่าง PFOS ได้ และที่พีเอช 5 หมู่ฟังก์ชันซิลานอลบนพื้นผิว SCP เป็นบวก ( $\text{Si-OH}_2^+$ ) ซึ่งน่าจะดูดซับสารประจุลบได้ดี แต่กลับมีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำที่สุด โดยสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับ PFOS ที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพสูงน่าจะเกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้นที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแบบขอบน้ำได้ดี และที่พีเอช 9 มีแรงผลักทางประจุที่มีค่ามากกว่าพีเอช 7 จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า โดยที่พีเอช 5 มีประจุบวกอิสระ ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) ที่อยู่ในน้ำสูงทำให้สาร PFOS สามารถเข้าทำปฏิกิริยาและคงอยู่ในน้ำได้ดี จึงเป็นผลทำให้

ความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 9 ถึงแม้จะมีพื้นผิวเป็นบวกที่น่าจะส่งเสริมด้วยการดูดซับด้วยแรงทางประจุก็ตาม



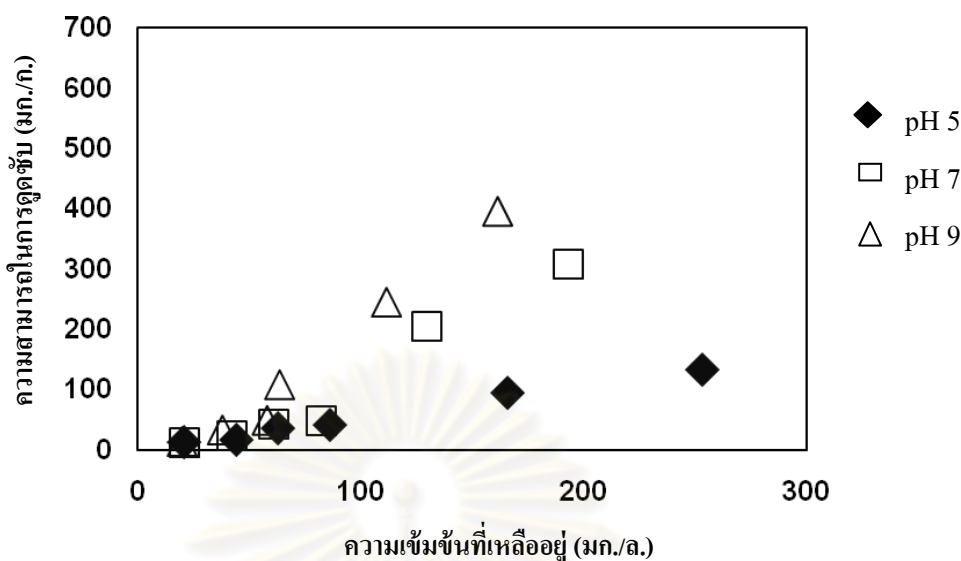
รูปที่ 4.24 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ A-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากผลการทดลองศึกษาการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ A-SCP พบว่าการดูดซับ PFOS ที่ความเข้มข้นต่ำมีประสิทธิภาพสูงที่พีเอช 7 และที่ความเข้มข้นสูงขึ้น A-SCP จะมีความสามารถในการดูดซับได้ดี ที่พีเอช 9 โดยตัวกลางดูดซับ A-SCP มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 261, 264 และ 388 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งจากการพิจารณาพบว่ากลไกการดูดซับไม่สอดคล้องกับการดึงดูดด้วยแรงทางประจุ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน่าจะเป็นการดึงดูดกับประจุบวกอิสระในน้ำ ( $H_3O^+$ ) ที่มีมากที่พีเอช 5 น่าจะเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับที่พีเอช 5 ลดลง เช่นเดียวกับในกรณีของ SCP



รูปที่ 4.25 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ M-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

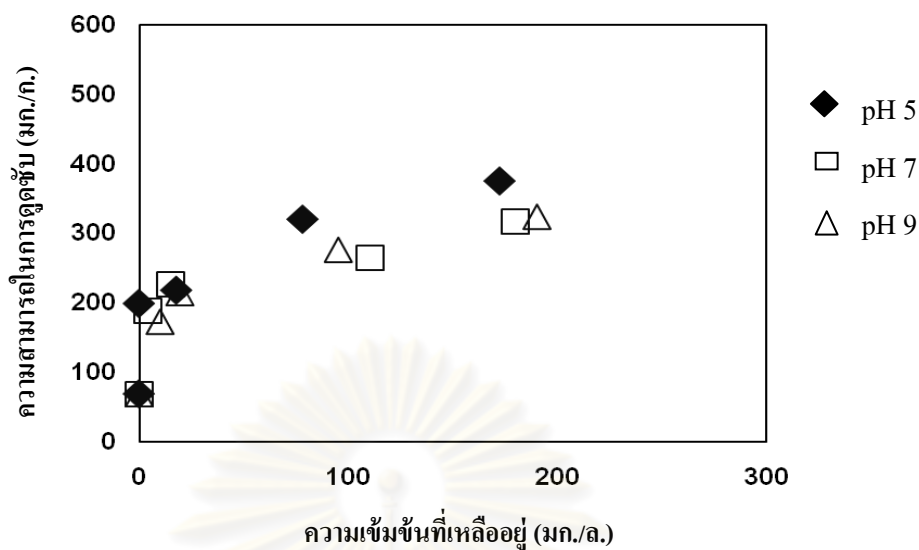
จากผลการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ M-SCP พบว่า ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ M-SCP สามารถดูดซับ PFOS ได้ดีที่พีเอช 7 และที่ช่วงความเข้มข้นสูง M-SCP สามารถดูดซับ PFOS ได้ดีที่พีเอช 9 โดยตัวกลางดูดซับ M-SCP มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 203, 193 และ 249 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ โดยที่พีเอช 5 มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำถึงแม้ว่าที่พีเอช 5 พื้นผิวของ M-SCP จะมีประจุบวกที่น่าจะส่งเสริมการดูดซับ PFOS ที่เป็นสารประจุลบก็ตาม ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวของ M-SCP น่าจะเป็นความสัมพันธ์ของพันธะไฮโดรเจน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ มากกว่าแรงทางประจุ



รูปที่ 4.26 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

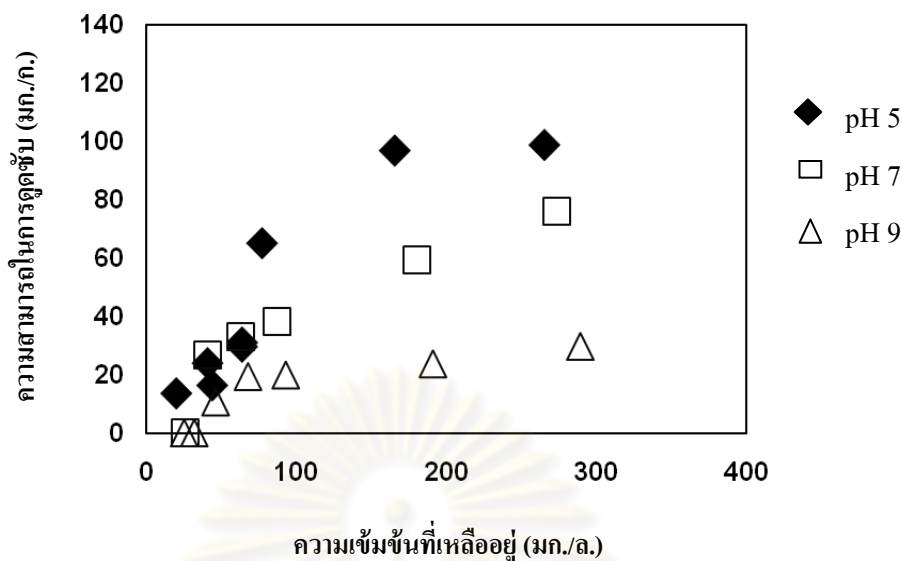
จากผลการทดลองการศึกษาความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP พบว่า ตัวกลางดูดซับ OD-SCP มีความสามารถในการดูดซับ PFOS ได้ดีในช่วงความเข้มข้นสูง โดยเฉพาะที่พีเอชเท่ากับ 7 และ 9 ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 307 และ 336 ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์ค่าทางประจุพบว่า บนพื้นผิวของ OD-SCP มีค่าเป็นลบ ซึ่งไม่สามารถส่งเสริมให้เกิดการดูดซับด้วยแรงทางประจุได้ โดยแรงหลักที่เกิดขึ้นในการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP เป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ รวมถึงการมีประจุบวกอิสระ ( $H_3O^+$ ) สูงที่พีเอช 5 ทำให้สาร PFOS สามารถเข้าทำปฏิกิริยาและคงอยู่ในน้ำได้ดีขึ้น จึงเป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 9





รูปที่ 4.27 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOS ของตัวกลางดูดซับ PAC (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

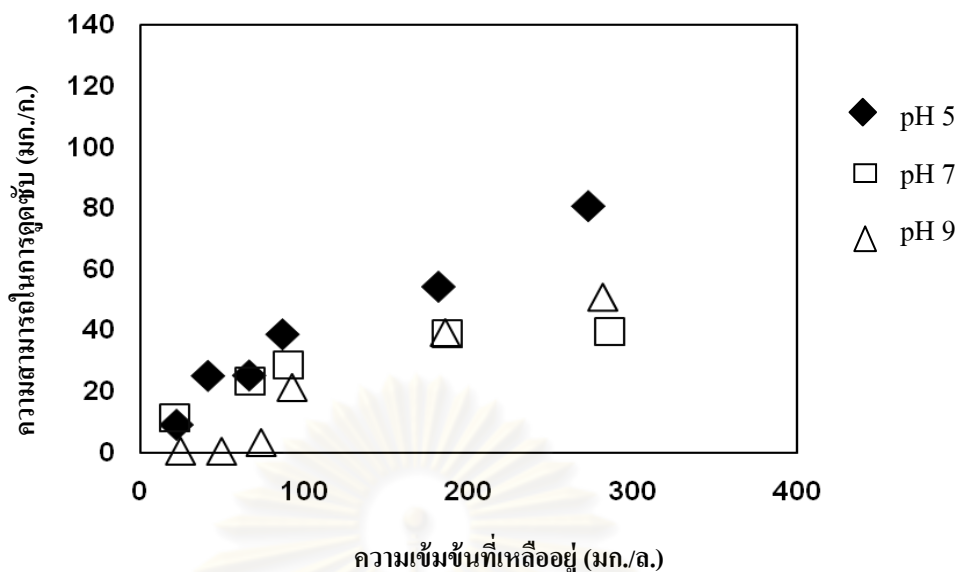
จากผลการทดลองพบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับ PFOS สูงที่ความเข้มข้นต่ำ และมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันที่พีเอชต่างๆ โดยตัวกลางดูดซับ PAC มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 376, 316 และ 323 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์การดูดซับ PFOS บนพื้นผิวของ PAC พบว่า เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และการมีพื้นที่ผิวมากเป็นหลัก รวมทั้งมีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิดทำให้ PFOS สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้หลายแบบ โดยที่แรงทางประจุมมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ PAC ได้ โดยที่พีเอช 5 PAC มีพื้นผิวเป็นบวกสามารถส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับ PFOS ให้สูงกว่าที่พีเอช 7 และ 9 ที่มีพื้นผิวเป็นลบ



รูปที่ 4.28 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ SCP  
(อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากผลการทดลองการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ SCP พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีความสัมพันธ์ความสอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุ โดยพบว่าที่พีเอช 5 พื้นผิวของ SCP มีประจุบวก ( $\text{Si-OH}_2^+$ ) ที่สามารถส่งเสริมให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับ PFOA ได้ โดยสามารถดูดซับ PFOA ได้มากที่สุด มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 98.86 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากกว่าที่พีเอช 7 และ 9 ในขณะที่พีเอช 9 ที่มีค่าประจุบนพื้นผิวเป็นลบ ( $\text{Si-OH}^-$ ) ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับ PFOA ที่มีประจุลบ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับที่พีเอช 9 ต่ำที่สุด เท่ากับ 29.71 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าประจุบนพื้นผิวของ SCP ที่พีเอช 7 และ 9 จะมีความเป็นลบเหมือนกัน แต่ค่าความแรงของประจุลบไม่เท่ากัน จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับที่พีเอช 7 และพีเอช 9 มีความแตกต่างกัน

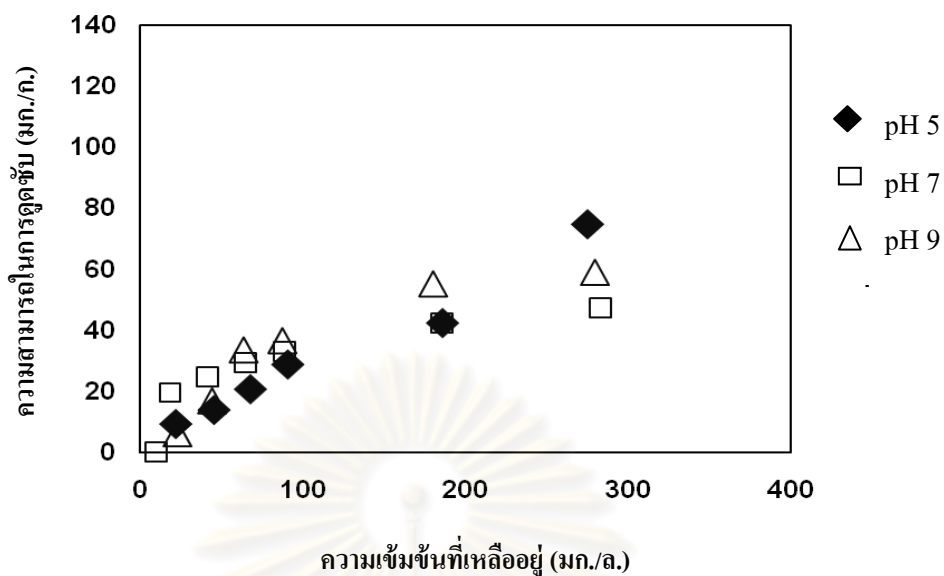
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.29 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ A-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากผลการทดลองการศึกษาการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ A-SCP พบว่าความสามารถในการดูดซับของ A-SCP มีความสอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุ โดย A-SCP มีความสามารถในการดูดซับ PFOA สูงสุดที่พีเอช 5 เท่ากับ 80.86 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่พื้นผิว A-SCP มีประจุบวก ( $\text{Si-NH}_3^+$ ) ทำให้สามารถเกิดการดึงดูดด้วยแรงทางประจุได้ และยังมีโอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากที่สุด จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูง ส่วนการดูดซับ PFOA ที่พีเอช 7 และพีเอช 9 มีความสามารถในการดูดซับในช่วงความเข้มข้นสูงใกล้เคียงกัน และพบว่าที่พีเอช 7 A-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่พีเอช 9 กลับมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำแรงทางประจุ และพันธะไฮโดรเจนจะมีผลต่อการดูดซับของ A-SCP มากกว่าในช่วงความเข้มข้นสูง

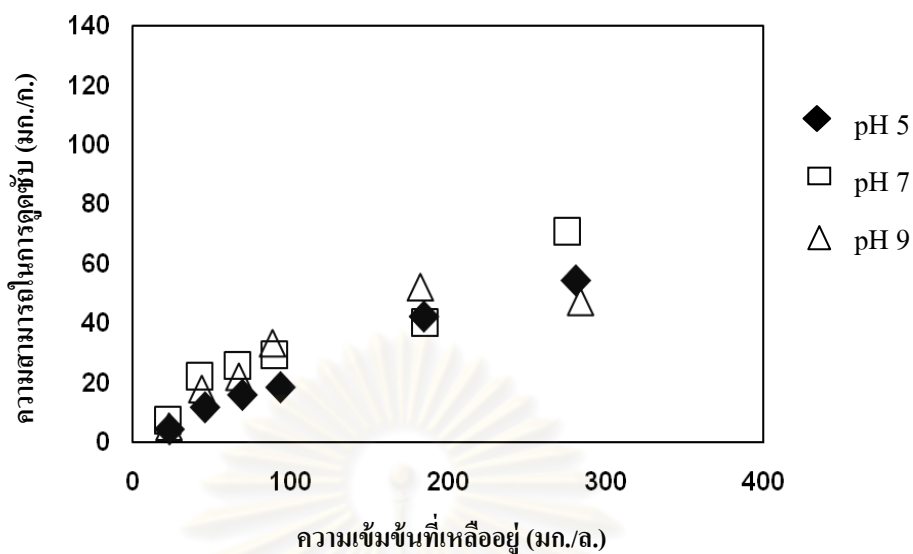
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ M-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

จากผลการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ M-SCP พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 74.73, 47.43 และ 59.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ โดยที่พีเอชต่างๆ M-SCP มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน ซึ่งแนวทางประจุมมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสูง เป็นสาเหตุทำให้ในช่วงความเข้มข้นสูง ที่พีเอช 5 ตัวกลางดูดซับ M-SCP มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าที่พีเอชอื่น เนื่องจากที่พีเอช 5 ประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ M-SCP มีค่าเป็นบวกเล็กน้อยจึงส่งเสริมให้เกิดการดูดซับด้วยแนวทางประจุได้

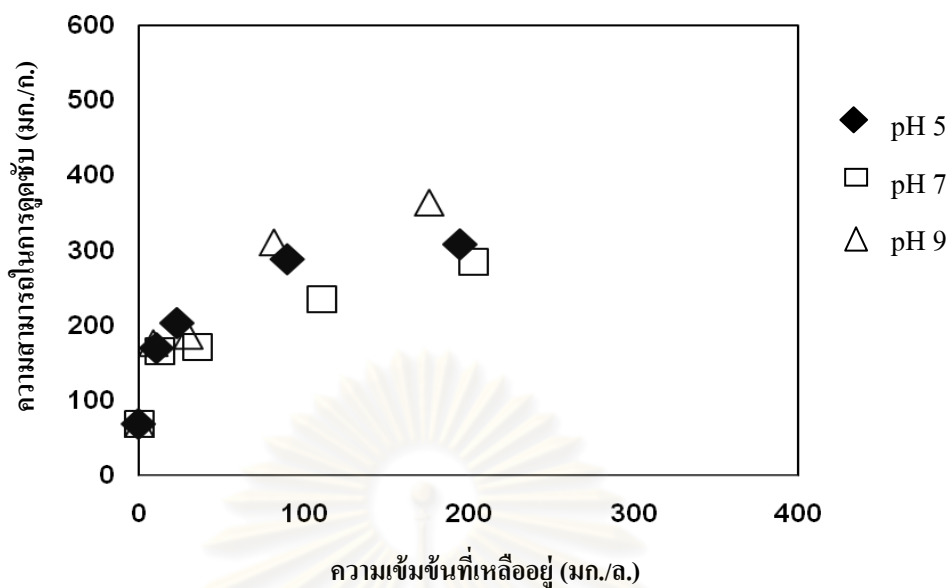
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ OD-SCP พบว่า ตัวกลางดูดซับ OD-SCP มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 54.35, 71.04 และ 47.42 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ โดยไม่พบความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดซับกับประจุบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ช่วงค่าพีเอชต่างๆ ความสามารถในการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับของ OD-SCP ขึ้นอยู่กับแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นปัจจัยหลัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.32 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับ PAC (อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่า Ionic strength 0.01 โมลต่อลิตร)

การศึกษาการดูดซับสาร PFOA ของ PAC พบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับ PFOA สูง มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 309, 285 และ 364 มิลลิกรัมต่อกรัมที่พีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ โดยปัจจัยด้านแรงทางประจุไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสาร PFOA ของ PAC โดยเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับที่พีเอช 9 พบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับของ PAC น่าจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ที่สามารถดูดซับส่วนที่ไม่ชอบน้ำของ PFOA ไว้บนพื้นผิวของ PAC ได้ดี ในขณะที่พีเอช 5 พีเอช 7 มีความสามารถที่ใกล้เคียงกันถึงแม้จะมีค่าประจุบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับน่าจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งมีความโดดเด่นสำคัญต่อการดูดซับสูงมากกว่าสมบัติทางประจุทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของ PAC มีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด

การศึกษาการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสีย โดยอาศัยสมบัติการช่วยรวมตะกอนและการแยกอนุภาคด้วยแรงแม่เหล็ก โดยศึกษาผลของพีเอช ปริมาณที่เหมาะสม และผลของการมีอยู่ของสาร PFOS ในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยแรงแม่เหล็กของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ซึ่งในการทดลองได้เลือกใช้



ตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก 2 ชนิด คือ SCP และ M-SCP โดยทำการคัดเลือกตัวกลางดูดซับที่เป็นตัวแทนของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (SCP) และตัวแทนของหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ (M-SCP) จากการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสาร PFOS ได้ดีที่สุด

#### 4.4.1 ผลของพีเอชต่อการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

การศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยทำการทดสอบที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.1 ถึงตารางที่ ข.3 ในภาคผนวก ข พบว่า SCP สามารถตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 2 มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ประเมินด้วยค่าความขุ่นที่เหลือในน้ำเทียบกับเวลาดีที่สุด โดยสามารถลดปริมาณความขุ่นในน้ำได้ 99.49 % ในเวลาหนึ่งชั่วโมง ซึ่งสามารถลดความขุ่นในน้ำได้จาก 1294 NTU เหลือเพียง 6.63 NTU ในขณะที่ค่าพีเอชอื่นๆ สามารถลดความขุ่นให้เหลือเพียงประมาณ 30-50 NTU ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตกตะกอนเมื่อไม่ใช้แรงจากสนามแม่เหล็กที่สามารถลดความขุ่นในน้ำได้เพียง 82.5 % ที่พีเอช 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้แรงแม่เหล็กช่วยในการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกสามารถลดความขุ่นในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการทิ้งให้ตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงทั่วไปอย่างชัดเจน และเมื่อทดสอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ (M-SCP) พบว่าสามารถลดปริมาณความขุ่นได้ดีทุกค่าพีเอช โดยที่ช่วงพีเอช 2-7 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง M-SCP สามารถลดความขุ่นลงจากประมาณ 800 NTU เหลือเพียงประมาณ 1-4 NTU โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 - 4.8

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ SCP

SCP (0.2g/100 ml)	ความขุ่น (NTU)							
	เวลา (นาที)	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
	0	1294	1283	1322	1302	1270	1281	1283
	30	14.23	44.50	55	73.50	80	74	79
	60	6.63	30.75	44	56.50	57.50	55	54.25
ประสิทธิภาพ %		99.49	97.60	96.67	95.66	95.47	95.70	95.77

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP

M-SCP (0.1g/100 ml)	ความขุ่น (NTU)							
	เวลา (นาที)	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
0		812	716	734	812	764	770	834
30		3.70	8.35	4.35	6.83	6.93	19.5	26.25
60		1.88	5	2.15	4.13	1.13	12.73	15.25
ประสิทธิภาพ %		99.77	99.30	99.71	99.49	99.85	98.35	98.17

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยแรงแม่เหล็ก และกรณีที่ไม่ใช้แรงแม่เหล็กของ SCP และ M-SCP

SCP:pH 2 (0.1g/100 ml)	ความขุ่น (NTU)		M-SCP:pH 7 (0.1g/100 ml)	ความขุ่น (NTU)	
เวลา (นาที)	3500 เกาส์	-	เวลา (นาที)	3500 เกาส์	-
0	781	763	0	764	841
30	14.20	156	30	6.93	183
60	5.30	136	60	1.13	163
ประสิทธิภาพ %	99.32	82.5	ประสิทธิภาพ %	99.85	80.52

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง อนุภาคของ SCP ในน้ำจะมีแรง 4 ชนิดกระทำบนอนุภาคซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญของการตกตะกอน คือ

- 1) แรงดึงดูดระหว่างแมกเนไทต์ภายในอนุภาค SCP กับแม่เหล็ก
- 2) แรงโน้มถ่วงของโลก
- 3) แรงระหว่างประจุของตัวอนุภาค
- 4) แรงของแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าตามกฎของลอเรนซ์

(Lorentz force) โดยแรงลอเรนซ์สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.3 (จรัส บุญขรรพมา, 2551)

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \dots(4.3)$$

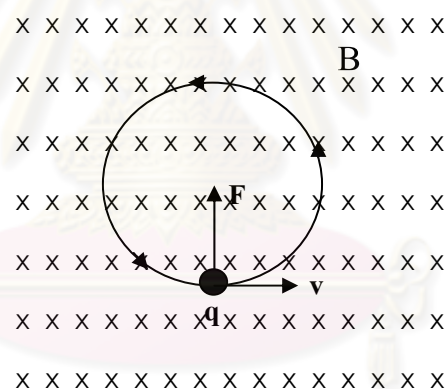
เมื่อ

$$\vec{F} = \text{แรงลอเรนซ์ (นิวตัน)}$$

$$q = \text{ประจุไฟฟ้า (คูลอมป์)}$$

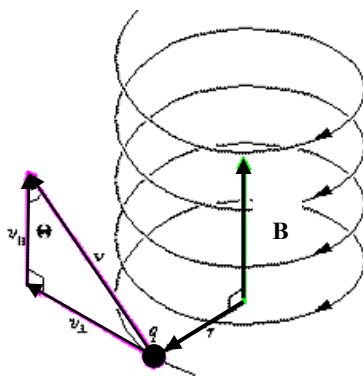
- $\vec{v}$  = ความเร็วของอนุภาค  $q$  (เมตรต่อวินาที)  
 $\times$  = สัญลักษณ์แสดง cross product ของเวกเตอร์  
 $\vec{B}$  = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)  
 (1 เกาส์ เท่ากับ  $10^{-4}$  เทสลา)

จากสมการจะเห็นว่า ขนาดของแรงแม่เหล็กแปรผันตรงกับขนาดและอัตราเร็วของประจุ ซึ่งทิศทางของแรงที่กระทำต่ออนุภาคจะขึ้นกับทิศทางของความเร็วและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เป็นไปตามกฎมือขวา โดยที่ชนิดของประจุจะมีผลต่อทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคเท่านั้น โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของประจุขึ้นอยู่กับมุมของทิศการเคลื่อนที่กับทิศของสนามแม่เหล็กบริเวณนั้น ซึ่งแบ่งได้เป็นสองลักษณะคือ ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม และประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวในสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.33 อนุภาคมีประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลมในสนามแม่เหล็ก  
 ที่มา: [http://www.rmutphysics.com/charud/virtual experiment](http://www.rmutphysics.com/charud/virtual%20experiment)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.34 อนุภาคมีประจุเคลื่อนที่เป็นเกลียวในสนามแม่เหล็ก  
เมื่อความเร็วของประจุทำมุมใดๆ กับสนามแม่เหล็ก  
ที่มา: [http://www.rmutphysics.com/charud/virtual\\_experiment](http://www.rmutphysics.com/charud/virtual_experiment)

ถ้าแรงกระทำต่ออนุภาคทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียว หรือแบบวงกลม จะได้  
แรงกระทำจากสนามแม่เหล็ก = แรงสู่ศูนย์กลาง ระยะเวลาในการเคลื่อนที่เป็นดังสมการที่ 4.4

$$T = 2\pi m / qB \quad \dots(4.4)$$

เมื่อ	T	= คาบการเคลื่อนที่เป็นวงกลม (นาท)
	m	= มวลของอนุภาค
	B	= ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)
	q	= ประจุไฟฟ้า (คูลอมป์)

จากสมการที่ 4.4 พบว่าถ้าเพิ่มความแรงของประจุไฟฟ้า q จะทำให้เวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคลดลง ดังนั้นจากการทดลองที่พีเอชต่างๆ จะทำให้ประจุบนพื้นผิวมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยที่ความแรงประจุน้อยๆ (พีเอช 5-7) อนุภาค SCP จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอนน้อยกว่าที่พีเอชต่ำมากๆ หรือพีเอชสูงมากๆ และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วกรณีที่มีประจุบวกมากๆ (พีเอช 2) เป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพการตกตะกอนดีที่สุด ส่วนตัวกลางดูดซับ M-SCP มีการตกตะกอนได้ดีมากทุกช่วงค่าพีเอชเมื่อเทียบกับ SCP โดยมีหลักการตกตะกอนที่เหมือน SCP แต่เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำได้ง่ายกว่า SCP ที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแบบชอบน้ำ ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการตกตะกอนมากกว่าแรงทางประจุอย่างชัดเจน ทำให้ที่พีเอชต่างๆ ความสามารถในการตกตะกอนของอนุภาค M-SCP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.4.2 ผลของปริมาณอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกต่อการแยกอนุภาคออกจากน้ำ

ปริมาณของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีผลต่อค่าความขุ่นในน้ำ ดังนั้นการหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับมลสาร และสามารถแยกออกจากน้ำได้มากที่สุดเป็นสิ่งสำคัญในการนำอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมาประยุกต์ใช้งานจริง โดยพบว่าการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงในระดับที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดลองประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่ปริมาณต่างๆ ของตัวกลางดูดซับ SCP และ M-SCP ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.4 ถึงตารางที่ ข.5 ในภาคผนวก ข

จากการทดลองพบว่าอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP) สามารถแยกออกจากน้ำได้ดี โดยที่ปริมาณอนุภาคๆ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อตกตะกอนของอนุภาคอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของอนุภาคที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำได้ดีและมีประสิทธิภาพสูง (มากกว่า 99.33 %) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดชอบน้ำ (SCP) เมื่อมากกว่า 0.2 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร จะทำให้ความขุ่นที่คงเหลือในน้ำมีค่าสูงขึ้นมากจนอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำทิ้งได้ เนื่องจากการมีอยู่ของอนุภาค SCP จำนวนมาก ทำให้แรงจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคไม่ทั่วถึง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอนุภาคในน้ำที่พีเอช 2 เป็นการเพิ่มเสถียรภาพทางประจุของอนุภาค SCP ในน้ำให้มากขึ้น โดยทำให้น้ำมีอนุภาคที่เป็นประจุบวกจำนวนมากเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคมากขึ้น สามารถต้านทานต่อการตกตะกอนได้

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ SCP

pH 2	ความขุ่น (NTU)					
	ปริมาณ SCP (กรัม) / 100 มิลลิลิตร					
เวลา (นาที)	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0	404	781	1294	1590	3681	5896
30	5.20	14.20	14.23	47.00	67.50	41.95
60	3.50	5.30	6.63	46.50	31.00	29.75
ประสิทธิภาพ %	99.13	99.32	99.49	97.08	99.16	99.50

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ M-SCP

pH 7	ความขุ่น (NTU)				
	ปริมาณ M-SCP (กรัม) / 100 มิลลิลิตร				
เวลา (นาที)	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6
0	382	763.8	1445	3468	4898
30	12.48	6.93	15.35	18.93	13.28
60	5.15	1.13	9.68	13.73	11.90
ประสิทธิภาพ %	98.65	99.85	99.33	99.60	99.76

#### 4.4.3 ผลของสาร PFOS ต่อการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็ก

จากการทดลองศึกษาผลของการมีอยู่ของสาร PFOS ต่อการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกพบว่า การที่อนุภาคของ SCP หรือ M-SCP มีการดูดซับสาร PFOS ไว้บนพื้นผิวมีผลให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคลดลง เนื่องจากปัจจัยที่สำคัญคือ การลดแรงของแม่เหล็กที่เข้าไปดึงดูดแกนกลางแมกเนไทต์ของอนุภาคฯ และการเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวเมื่อมีการดูดซับ โดยอนุภาคของ PFOS ที่ถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ SCP ที่เป็นพื้นผิวแบบชอบน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ซัลโฟเนต ( $-SO_3^-$ ) กับหมู่ฟังก์ชันซิลานอล ( $Si-OH$ ) จะทำให้ภายนอกอนุภาค SCP มีความเป็นประจุลดลง การตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่ออนุภาคมีประจุบวกมากๆ จึงลดลง ส่วนการดูดซับ PFOS บนพื้นผิว M-SCP ที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ โดยการดูดซับจะเกิดที่ส่วนไม่ชอบน้ำของ PFOS กับพื้นผิวของ M-SCP เป็นหลัก ทำให้ส่วนที่เป็นประจุลบของ PFOS หันออกด้านนอก การตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่ออนุภาคมีประจุบวกมากๆ จึงลดลงเช่นเดียวกัน จากปัจจัยดังกล่าวทำให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PFOS จึงทำให้ความสามารถในการตกตะกอนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งสองชนิดด้วยแรงแม่เหล็กลดลง โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนเมื่อมี PFOS 300 มิลลิกรัมต่อลิตรของ SCP และ M-SCP ลดลง 4.34 % และ 1.04 % ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.12 ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.6 ถึงตารางที่ ข.7 ในภาคผนวก ข



ตารางที่ 4.11 ปริมาณของสาร PFOS ต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของ SCP

SCP:pH 2 (0.1g/100 ml)	ความขุ่น (NTU)			
	ปริมาณ PFOS (มก./ล.)			
เวลา (นาที)	0	100	200	300
0	781	814	814	816
30	14.20	42.75	36.50	44.25
60	5.30	28.50	37.50	41.00
ประสิทธิภาพ %	99.32	96.50	95.39	94.98

ตารางที่ 4.12 ปริมาณของสาร PFOS ต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของ M-SCP

M-SCP:pH 7 (0.1g/100 ml)	ความขุ่น (NTU)			
	ปริมาณ PFOS (มก./ล.)			
เวลา (นาที)	0	100	200	300
0	763.8	901	926	882
30	6.93	12.73	12.20	17.08
60	1.13	4.75	9.70	10.48
ประสิทธิภาพ %	99.85	99.47	98.95	98.81

#### 4.4.4 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์

น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่มีส่วนผสมของดินขาว (Kaolin) ที่มีสูตรโครงสร้างคือ  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  ได้ถูกนำมาทำการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ โดยจากการทดลองพบว่า น้ำเสี้ยวสังเคราะห์มีความสามารถในการตกตะกอนได้ต่ำ โดยที่พีเอช 2 สามารถตกตะกอนได้ดีที่สุด ซึ่งจากการทดลองที่พีเอช 2 สามารถตกตะกอนได้จาก 100 NTU เหลือประมาณ 60 NTU ในขณะที่เมื่อทำการทดลองที่ค่าพีเอชสูงขึ้นสามารถตกตะกอนความขุ่นได้น้อยมาก ดังแสดงผลในตารางที่ 4.13 ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.8 ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 100 NTU

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)						
	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
0	107	105	105	106	103	105	104
30	79.25	73.25	104.25	102.25	95.25	103.5	95.25
60	61.00	63.50	101.80	91.50	97.00	96.50	93.50
ประสิทธิภาพ %	42.99	39.23	2.63	13.27	5.37	8.10	10.31

จากการวิเคราะห์ค่าทางประจุของดินขาว โดยการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Zbik, Smart และ Morris, 2008) พบว่า ที่พีเอช 2 ประจุบนพื้นผิวของดินขาวมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ หรือมีความแรงของประจุลบน้อยที่สุด ในขณะที่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าประจุบนพื้นผิวมีค่าลบมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการผลัดกันของอนุภาคที่มีประจุเหมือนกันในน้ำ อนุภาคจึงสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นานมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการตกตะกอนที่พีเอชสูงซึ่งมีค่าลดลง

#### 4.4.5 ผลของค่าความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการแยกอนุภาคออกจากน้ำ

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์จะทำให้สามารถตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากเมื่อค่าความขุ่นมากขึ้น อนุภาคในน้ำสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีขึ้น โดยพบว่าที่ค่าความขุ่น 400 NTU มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอช 2 สูงที่สุด โดยสามารถลดความขุ่นจาก 400 NTU เหลือ 73 NTU มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เวลา 60 นาที ประมาณ 82 % ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.14 ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.9 ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความขุ่นต่างๆ ~

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)			
	ความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ (NTU), พีเอช 2			
	≈ 100	≈ 200	≈ 300	≈ 400
0	108	205.75	304.5	404.75
30	77	184.3	183.3	159
60	60	88.25	81.75	73.00
ประสิทธิภาพ %	44.44	57.11	73.15	81.96

#### 4.4.6 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นน้ำเสียสังเคราะห์โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

การทดสอบประสิทธิภาพการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการช่วยตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่นสูง โดยอาศัยสมบัติการแยกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กเพื่อรวมอนุภาคแขวนลอยในน้ำ ซึ่งในการทดลองได้ใช้ความขุ่นน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 400 NTU ร่วมกับการใช้อนุภาค SCP และ M-SCP 0.1 กรัม ทำให้มีความขุ่นเริ่มต้นในการทดลองประมาณ 1200-1500 NTU จากการทดลองพบว่า การใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งสองชนิด (SCP และ M-SCP) สามารถช่วยลดความขุ่นในน้ำได้ แต่ยังไม่สามารถช่วยในการตกตะกอนอนุภาคความขุ่นได้ทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่าที่พีเอช 2 SCP และ M-SCP มีประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นดีที่สุด และ SCP สามารถช่วยในการตกตะกอนความขุ่นได้ดีกว่า M-SCP โดยสามารถลดค่าความขุ่นในน้ำให้เหลือ 16.18 NTU จากค่าเริ่มต้นที่ 1251 NTU มีประสิทธิภาพ 98.71 % โดยในช่วงค่าพีเอช 4-12 ไม่สามารถช่วยลดค่าความขุ่นในน้ำได้ในขณะที่ M-SCP สามารถลดค่าความขุ่นในน้ำให้เหลือ 50.30 NTU จากค่าเริ่มต้น 1346 NTU คิดเป็นประสิทธิภาพ 96.27 % ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และ 4.16 ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.10 ถึงตารางที่ ข.11 ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ SCP ในน้ำเสียสังเคราะห์

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU) (ดินขาว $\approx$ 400 NTU: SCP 0.1g: 100 ml)						
	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
0	1251	1203.25	1195.75	1279	1169	1223	1271
30	87.25	219.5	440.5	373.5	421.75	415.5	478.5
60	16.18	218	387	356	396.75	404.25	419
ประสิทธิภาพ %	98.71	81.88	67.64	72.17	66.06	66.95	67.03

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP ในน้ำเสียสังเคราะห์

เวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU) (ดินขาว $\approx$ 400 NTU: M-SCP 0.1g: 100 ml)						
	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
0	1346	1438	1386	1371	1339	1561	1559
30	77.25	195	314.80	284.25	353.25	363.50	400.75
60	50.30	156.25	257.25	270	333.25	337.00	341.75
ประสิทธิภาพ %	96.27	89.14	81.43	80.31	75.10	78.40	78.07

ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ซึ่งเมื่ออนุภาคดินขาวในน้ำ มีประจุเป็นลบที่พีเอชมากกว่า 2 การปรับค่าพีเอชของน้ำให้น้อยกว่า  $pH_{zpc}$  ของ SCP หรือ M-SCP (6.2 และ 5.6 ตามลำดับ) จะทำให้ประจุบนพื้นผิว SCP และ M-SCP มีประจุบวก โดยที่พีเอชยังมีค่าน้อยจะทำให้ความแรงประจุบวกของอนุภาคมีมากขึ้น สามารถดึงดูดอนุภาคความขุ่นในน้ำที่มีประจุลบได้ดียิ่งขึ้น ทำให้สามารถรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่และส่งเสริมความสามารถในการตกตะกอนสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่า M-SCP สามารถช่วยลดค่าความขุ่นน้ำเสียได้ที่ช่วงค่าพีเอชอื่นๆ ได้เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของ M-SCP ที่ยังสามารถส่งเสริมความสามารถในการตกตะกอนได้อีกด้วย จากการวิเคราะห์จะเห็นว่าการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก มาช่วยในการตกตะกอนความขุ่นของน้ำเสียยังไม่สามารถลดค่าความขุ่นของน้ำให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้ และยังมีข้อจำกัดด้านการใช้งานที่พีเอชที่ต่ำมากซึ่งเป็นการยากที่จะใช้งานในสภาวะจริงได้

#### 4.4.7 ประสิทธิภาพการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียที่มีสาร PFOS

จากผลการทดลองพบว่า การมีอยู่ของสาร PFOS มีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นของ SCP ที่พีเอช 2 ลดลงประมาณ 1.45 % โดยสามารถลดค่าความขุ่นในน้ำให้เหลือ 33.75 NTU เมื่อมีค่าความขุ่นเริ่มต้น 1232 NTU ในขณะที่การมีอยู่ของสาร PFOS ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นของ M-SCP เพียงเล็กน้อย มีประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นประมาณ 96.3 % โดยสามารถลดค่าความขุ่นในน้ำให้เหลือ 45.75 NTU เมื่อมีค่าความขุ่นเริ่มต้น 1253 NTU สอดคล้องกับการทดลองข้อที่ 4.4.3 โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.17 ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงดังตารางที่ ข.12 ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพการใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียที่มีสาร PFOS

pH 2	ความขุ่น (NTU)	
	ความขุ่นน้ำเสีย $\approx$ 400 NTU : PFOS 100 mg/l	
เวลา (นาที)	SCP (0.1g/100 ml)	M-SCP (0.1g/100 ml)
0	1232	1253
30	80	63.25
60	33.75	45.75
ประสิทธิภาพ %	97.26	96.35

จากการวิเคราะห์ผลการตกตะกอนความขุ่นน้ำเสียสังเคราะห์ของ SCP และ M-SCP เมื่อมีสาร PFOS พบว่าการดูดซับสาร PFOS ไว้บนพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งสองชนิดจะส่งผลให้แรงของแม่เหล็กที่เข้าไปดึงดูดแกนกลางแมกเนไทต์ของอนุภาคฯ ลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคฯ เปลี่ยนแปลงไปคือ ทำให้อนุภาค SCP มีความเป็นประจุบวกลดน้อยลง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปัจจัยด้านแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคดินขาวกับอนุภาค SCP ที่เป็นปัจจัยหลักต่อการตกตะกอน จึงทำให้การมีอยู่ของสาร PFOS ส่งผลต่อความสามารถในการดึงดูดอนุภาคดินขาวในน้ำของอนุภาค SCP ในขณะที่การดูดซับสาร PFOS ไว้บนพื้นผิวอนุภาค M-SCP มีผลต่อการลดลงของประจุบวกบนพื้นผิวของ M-SCP เช่นเดียวกับกรณีของ SCP แต่เนื่องจากการมีสมบัติไม่ชอบน้ำของ M-SCP น่าจะเป็นปัจจัยที่ยังช่วยให้ความสามารถในการตกตะกอนมีค่าใกล้เคียงในกรณีที่ไม่มีสาร PFOS

สำหรับการนำอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทพร้อมทั้งกำจัดความขุ่นของน้ำเสียในการใช้งานจริง ต้องทำการดำเนินระบบที่ช่วงค่าพีเอชค่า (พีเอช 2) เพื่อให้เกิดการดึงดูดระหว่างประจุของอนุภาค SCP หรือ M-SCP กับอนุภาคความขุ่นในน้ำ ซึ่งที่สภาวะพีเอชดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ในน้ำเสียจริงที่มีสาร PFOS ซึ่งเป็นกรดแก่ทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชค่า จึงสามารถดำเนินงานได้ง่ายหรือสิ้นเปลืองสารเคมีเพียงเล็กน้อย และเมื่อกล่าวถึงผลของสาร PFOS ที่ส่งผลให้ความสามารถในการตกตะกอนความขุ่นด้วย SCP และ M-SCP ลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนยังต่ำ โดยสามารถตกตะกอนความขุ่นที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้นประมาณ 1230 NTU เหลือประมาณ 40 NTU ซึ่งถือเป็นค่าความขุ่นที่ยังคงมีค่าสูงเป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นจึงยังคงต้องมีการดำเนินงานร่วมกับการใช้วิธีการตกตะกอนทั่วไปด้วย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท ที่พบในสิ่งแวดล้อม และกำจัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ยาก ด้วยกระบวนการดูดซับโดยการเลือกใช้ตัวกลางดูดซับชนิดใหม่ที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นตัวกลางดูดซับที่มีแกนกลางเป็นอนุภาคนาโนของแมกเนไทต์ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก ซึ่งทำให้มีลักษณะเฉพาะในการสามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำได้ง่ายโดยใช้แรงดึงดูดของสนามแม่เหล็ก และสามารถปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ให้เหมาะสมต่อการดูดซับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียที่มีความขุ่นสูง ร่วมกับการกำจัดมลสารในน้ำ

##### 5.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับทุกชนิดได้ถูกทำการศึกษาและนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนท โดยได้ทำการศึกษา ประจุบนพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว พื้นที่ผิว ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และลักษณะพื้นผิว ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน และการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดทำให้ขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่การต่อติดหมู่ฟังก์ชันจะส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวตามชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่ทำการต่อติดบนพื้นผิว ซึ่งพบว่า A-SCP จะมีค่า  $pH_{zpc}$  ที่มากที่สุดคือประมาณ 7-8 ในขณะที่ SCP, M-SCP, OD-SCP และ PAC มีค่า  $pH_{zpc}$  เท่ากับ 6.2, 5.6, 3.8 และ 6.8 ตามลำดับ

##### 5.1.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ตัวกลางดูดซับทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับ PFOS ได้สูงกว่า PFOA ซึ่งเกิดจากขนาดโครงสร้างโมเลกุลและความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกันของสารทั้งสองชนิดเป็นปัจจัยสำคัญ โดยความสามารถในการละลายน้ำของ PFOA มีมากกว่า PFOS ถึงประมาณ 7 เท่า จึงทำให้ PFOS สามารถดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับได้ง่ายกว่า PFOA และจะเห็นได้ว่าตัวกลาง



ดูดซับทุกชนิดเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับที่เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง โดยการดูดซับสามารถใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมาอธิบายอัตราการดูดซับได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดและถ่านกัมมันต์ชนิดผง สอดคล้องกับกลไกการดูดซับทางเคมี

### 5.1.3 ประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่า PAC มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง และมีความสามารถในการดูดซับสูงที่ความเข้มข้นต่ำ โดยความสามารถในการดูดซับสาร PFOA และ PFOS ของ PAC เนื่องมาจากการมีพื้นที่ผิวมาก และยังมีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายทำให้ PFOA และ PFOS สามารถเข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวได้หลายรูปแบบ ทำให้ความสามารถในการดูดซับของ PAC มีความใกล้เคียงกัน ส่วนตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีความสามารถในการดูดซับ PFOS บนพื้นผิวแบบชอบน้ำสูงกว่าการดูดซับบนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นสูง (300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ประสิทธิภาพในการกำจัด PFOS ของ SCP สูงถึง 75.63 % ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด PFOS ของ PAC มีเพียง 43.14 % โดยแรงหลักที่สำคัญในการดูดซับบนพื้นผิวแบบชอบน้ำเป็นกลไกทางเคมี คือ พันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) หรือหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Si-NH<sub>2</sub>) ของ SCP และ A-SCP ตามลำดับ ซึ่งการดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวแบบชอบน้ำมีโอกาสในการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นได้ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าการดูดซับบนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ และพบว่า การดูดซับสาร PFOS ไม่มีความสัมพันธ์กับแรงทางประจุ โดยตัวกลางดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับ PFOS ได้ดีที่พีเอช 9 ยกเว้น SCP ที่มีความสามารถในการดูดซับสูงที่พีเอช 7 ในขณะที่การดูดซับบนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของ PFOS เพิ่มมากขึ้น โดยที่ M-SCP จะมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า OD-SCP เล็กน้อยที่ความเข้มข้นต่ำๆ เนื่องจากมีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิลของ PFOS ได้ แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับ PFOS บนพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ของ OD-SCP จะมีเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน

ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด พบว่า แรงทางประจุมีผลส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับ PFOA ของตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดที่พีเอช 5 ที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวก ส่วนตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำมีประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงทางกายภาพเป็นหลัก

#### 5.1.4 การประยุกต์ใช้อุณหภูมิที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกกำจัดความขุ่นของน้ำเสียที่มีความขุ่นสูงร่วมกับการกำจัดมลสารในน้ำ

แรงหลักที่ส่งผลต่อการตกตะกอนของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งชนิดชอบน้ำ (SCP) และชนิดไม่ชอบน้ำ (M-SCP) คือ แรงดึงดูดระหว่างแมกเนไทต์ภายในอนุภาค SCP กับแรงแม่เหล็กเป็นหลัก โดยมีแรงโน้มถ่วง แรงผลักระหว่างประจุของตัวอนุภาค และแรงลอเรนซ์ช่วยส่งเสริมในการตกตะกอน โดยแรงที่เกิดจากความแรงประจุในน้ำที่กระทำต่อสนามแม่เหล็ก (แรงลอเรนซ์) มีผลต่อการส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนของ SCP เร็วขึ้น ในขณะที่ M-SCP มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญมากกว่าอิทธิพลทางประจุในน้ำ จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่มีผลต่อการตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การดูดซับสาร PFOS ไว้บนพื้นผิวและการเพิ่มความเข้มข้นของ PFOS ทำให้ความสามารถในการตกตะกอนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทั้งสองชนิดลดลง โดยที่ SCP จะได้รับผลกระทบมากกว่า M-SCP เนื่องจากการดูดซับ PFOS มีผลต่อประจุบนพื้นผิวของอนุภาค นอกจากนี้ยังลดขนาดของแรงของแม่เหล็กที่เข้าไปดึงดูดแกนกลางแมกเนไทต์ของอนุภาคด้วย โดยตัวกลางดูดซับ SCP สามารถตกตะกอนได้ดีที่สุดที่พีเอช 2 (99.49 %) และตัวกลางดูดซับ M-SCP สามารถตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 2-7 (>99.30 %) ความขุ่นที่เหลือในน้ำน้อยกว่า 6 NTU ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการใช้งานจริง M-SCP ที่สามารถดูดซับ PFOS ได้ต่ำกว่า SCP แต่สามารถทำงานในสภาวะปกติ (พีเอช 5-7) น่าจะเหมาะสมกว่าการใช้ตัวกลางดูดซับ SCP ที่ต้องการการทำงานที่พีเอชต่ำ ซึ่งเป็นการยากและสิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอชของน้ำให้ต่ำ และการปรับกลับคืนให้ได้พีเอชที่เป็นกลางตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยการเพิ่มปริมาณตัวกลางดูดซับ M-SCP ให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับมลสาร น่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมมากกว่า

จากการทดลองนำอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมาช่วยในการรวมตะกอนและแยกออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า โดยที่พีเอชยังมีค่าน้อยจะทำให้ความแรงประจุบวกของอนุภาค SCP และ M-SCP มีมากขึ้นสามารถดึงดูดอนุภาคความขุ่นในน้ำที่มีประจุลบได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ความสามารถในการตกตะกอนสูงยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถลดค่าความขุ่นของน้ำให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 10 NTU ได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การมีอยู่ของสาร PFOS ในน้ำยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นของ SCP โดยการดูดซับสาร PFOS ไว้บนพื้นผิวของอนุภาคจะส่งผลให้ประจุบวกของอนุภาคลดลงทำให้ความสามารถในการดึงดูดกับอนุภาคคินชาวที่แขวนลอยในน้ำลดลง ส่วนประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นของ M-SCP เมื่อมีสาร PFOS ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ช่วยส่งเสริมในการตกตะกอน ดังนั้นในการดำเนินระบบจริงยังคงต้องมีการดำเนินงานร่วมกับการใช้วิธีการตกตะกอนทั่วไปด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษากระบวนการแข่งขันคัดเลือกการดูดซับสารประกอบเพอร์ฟลูออรีเนทกับมลสารชนิดอื่นในน้ำเสียด้วยการใช้อุณหภูมิที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ

5.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับ (Regeneration) ของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

5.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการนำตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกไปใช้งานจริง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กานดา สุรณกุลพานิช, ชูชัย ลืออุทัย และพิศุทธิ์ อนุรัตน์. 2545. การดูดซับฟีนอลในน้ำเสียโดยใช้  
เถ้าแกลบคั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จรัส บุญยธรรมมา. 2551. ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก [online].

แหล่งที่มา: [http://www.rmutphysics.com/charud/virtual\\_experiment](http://www.rmutphysics.com/charud/virtual_experiment) [2009, February 11]

ณัฐพันธ์์ สุขกา. 2549. ใจปริศนาเทคโนโลยี [online]. แหล่งที่มา:

<http://www.VCharkarn.com> [2008, June 21]

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร:

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชนีย์ คู่ยเสียม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่าน

กัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชา  
วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

Armitage, J., Cousins, I.T., Buck, R.C., Prevedouros, K., Russell, M.H., MacLeod, M., and  
Korzeniowski, S.H. 2006. Modeling global-scale fate and transport of  
perfluorooctanoate emitted from direct sources. Environ. Sci. Technol. 40: 6969-6975.

Bruce, J.I., Taylor, J., Todd, M., Davies, J.M., Borioni, E., Sangregorio, C., and Sen, T. 2004.  
Synthesis, characterization and application of silica-magnetite nanocomposites. Journal  
of Magnetism and Magnetic materials. 248: 145-160.

Campo, A.D., Sena, T., Lellouche, J.P., and Bruce, I.J. 2005. Multifunctional magnetite and  
silica-magnetite nanoparticles: Synthesis, surface activation and applications in life  
sciences. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 293: 33-40.

Chin, C.M., Chen, P.W., and Wang, L.J. 2006. Removal of nanoparticles from CMP wastewater  
by magnetic seeding aggregation. Chemosphere. 63: 1809-1813.

Dimitrov, S., Kamenska, V., Walker, J.D., Windle, W., Purdy, R., Lewis, M., and  
Mekenyan, O. 2004. Predicting the biodegradation products of perfluorinated chemicals  
using CATABOL. SAR QSAR Environ. Res. 15: 69-82.

- Dinglasan, M.J., Ye, Y., Edwards, E.A., and Mabury, S.A. 2004. Fluorotelomer alcohol biodegradation yields poly and perfluorinated acid. Environ. Sci. Technol. 38: 2857-2864.
- Ellis, D.A., Martin, J.W., De Silva, A.O., Mabury, S.A., Hurley, M.D., Sulbaek, A.M.P., and Wallington, T.J. 2004. Degradation of fluorotelomer alcohols: a likely atmospheric source of perfluorinated carboxylic acids. Environ. Sci. Technol. 38: 3316-3321.
- Gupta, A.K., and Gupta, M. 2004. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. Biomaterials. 26: 3665-4021.
- Hansen, K.J., Johnson, H.O., Eldridge, J.S., Butenhoff, J.L., and Dick, L.A. 2002. Quantitative characterization of trace levels of PFOS and PFOA in the Tennessee River. Environ. Sci. Technol. 36: 1681-1685.
- Harada, K., Saito, N., Inoue, K., Yoshinaga, T., Watanabe, T., Sasaki, S., Kamiyama, S., and Koizumi, A. 2004. The influence of time, sex and geographic factors on levels of perfluorooctane sulfonate in human serum over the last 25 year. J. Occup Health. 46: 141-147.
- Higgins, C.P., and Luthy, R.G. 2006. Sorption of perfluorinated surfactants on sediments. Environ. Sci. Technol. 40: 7251-7256.
- Ho, L.S.W. 2007. Discriminating and assessing adsorption and biodegradation removal mechanisms during granular activated carbon filtration of microcystin toxins. Water Research. 41: 4262-4270.
- Hori, H., Nagaoka, Y., Yamamoto, A., Sano, T., Yamashita, N., Taniyasu, S., Kutsuna, S., Osaka, I., and Arakawa, R. 2006. Efficient decomposition of environmentally persistent perfluorooctanesulfonate and related fluorochemicals using zerovalent iron in subcritical water. Environ. Sci. Technol. 40: 1049-1054.
- Houde, M., Martin, J.W., Letcher, R.J., Solomon, K.R., and Muir, D.C.G. 2006. Biological monitoring of polyfluoroalkyl substances: a review. Environ. Sci. Technol. 40: 3463-3473.
- Huang, H.S., and Chen H.D. 2009. Rapid removal of heavy metal cations and anions from aqueous solution by an amino-functionalized magnetic nano-adsorbent. Journal of Hazardous Materials. 163: 174-179.



- Kim, D.H. 2006. Surface-modified magnetite nanoparticles for hyperthermia: Preparation, characterization, and cytotoxicity studies. Current Applied Physics. 681: 242-246.
- Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles, H.A., and Seed, J. 2007. Perfluoroalkyl acids: a review of monitoring and toxicological findings. Toxicol. Sci. 99: 366-394.
- Liu, X., Ma, Z., Xing, J., and Liu, H. 2004. Preparation and characterization of amino-Silane modified superparamagnetic silica nanospheres. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 270: 1-6.
- Liu, X., Xing, J., Guan, Y., Shan, G., and Liu, H. 2004. Synthesis of amino-silane modified superparamagnetic silica supports and their use for protein immobilization. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 238: 127-131.
- Ma, Z., Guana, Y., and Liu, H. 2006. Superparamagnetic silica nanoparticles with immobilized metal affinity ligands for protein adsorption. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 301: 469-477.
- Ma, Y., Qi, L., Wu, Y., Liu, O., and Cheng, H. 2003. Large-pore mesoporous silica spheres: synthesis and application in HPLC. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 229: 1-8.
- Ochao-Herrera, V., and Sierra-Alvarez, R. 2008. Removal of perfluorinated surfactants by sorption onto granular activated carbon, zeolite and sludge. Chemosphere. 72: 1588-1593.
- Punyapalakul P. 2004. Removal of Alkylphenol Polyethoxylates Using Hexagonal Mesoporous Silicates. Doctor dissertation, Department of Urban Engineering Graduate School of Engineering, University of Tokyo.
- Sakai, Y., Miama, T. and Takahashi, F. 1997. Simultaneous removal of organic and nitrogen compounds in intermittently aerated activated sludge process using magnetic separation. Water Research. 31: 2113-2116.
- Sun, Y.P., Li, X.Q., Cao, J., Zhang, W.X., and Wang, H.P. 2006. Characterization of zerovalent iron nanoparticles. Advances in Colloid and Interface Science. 120: 47-56.
- Tang, Y.C., Fu, S.Q., Robertson, P.A., Criddle, S.C., and Leckie, O.J. 2006. Use of reverse osmosis membranes to remove perfluorooctane sulfonate (PFOS) from semiconductor wastewater. Environ. Sci. Technol. 40: 7343-7349.

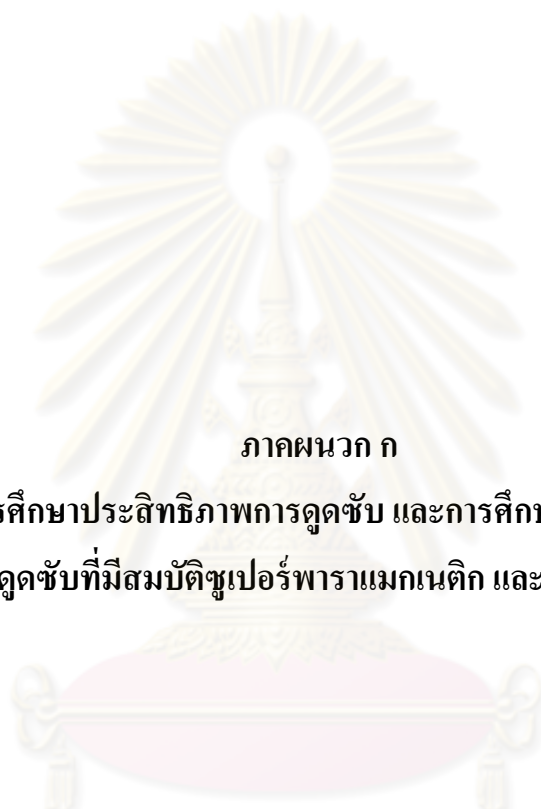


- Tseng, C.L., Liu, L.L., Chen, C.M., and Ding, W.H. 2006. Analysis of perfluorooctanesulfonate and related fluorochemicals in water and biological tissue samples by liquid chromatography–ion trap mass spectrometry. Journal of Chromatography A. 1105: 119-126.
- Wu, R., Qu, J., He, H., and Yu, Y. 2004. Removal of azo-dye Acid Red B (ARB) by adsorption and catalytic combustion using magnetic  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  powder. Applied Catalysis B: Environmental. 48: 49-56.
- Yong Q. 2007. Study on treatment technologies for perfluorochemicals in wastewater. Doctor dissertation, Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University.
- Yu, Q., Deng, S., and Yu, G. 2008. Selective removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous solution using chitosan-based molecularly imprinted polymer adsorbents. Water Research. 42: 3089-3097.
- Yu, Q., Zhang, R., Deng, S., Huang, J., and Yu, G. 2009. Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin: Kinetic and isotherm study. Water Research. 43: 1150-1158.
- Zbik, S.M., Smart, St.C.R., and Morris, E.G. 2008. Kaolinite flocculation structure. Journal of Colloid and Interface Science. 328: 73-80.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ และการศึกษาจลนพลศาสตร์  
ของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

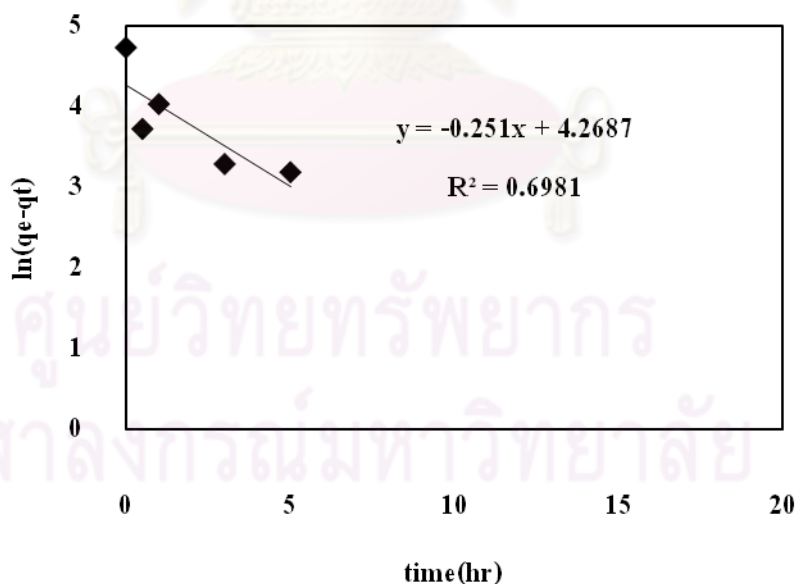
### ตัวอย่างการคำนวณค่าจลนพลศาสตร์การดูดซับ

- ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม

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

- เมื่อ  $k_1$  = ค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (ชั่วโมง<sup>-1</sup>)  
 $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา  
 สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ  
 (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $t$  ดังรูปที่ ก.1 จะสามารถ  
 คำนวณค่า  $\ln q_e$  ได้จากค่าจุดตัดแกนตั้ง และค่าคงที่  $k_1$  ได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรง



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $t$  สำหรับปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากสมการ  $y = -0.251x + 4.2687$  มีค่าจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ 4.2687 และค่าความชันของกราฟเส้นตรงเท่ากับ 0.251 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า  $q_e$  และค่าคงที่  $k_1$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \ln q_e &= \text{จุดตัดแกนตั้ง} \\ &= 4.2687 \\ \text{ดังนั้น} \quad q_e &= 71.43 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม} \end{aligned}$$

สามารถหาค่าคงที่  $k_1$  ได้จากความชันของกราฟเส้นตรง โดยที่

$$\begin{aligned} k_1 &= \text{ความชันของกราฟเส้นตรง} \\ &= 0.251 \text{ ชั่วโมง}^{-1} \end{aligned}$$

ผลการคำนวณค่า  $\ln(q_e - q_t)$  ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบการดูดซับสาร PFOS และ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ที่พีเอช 7 แสดงดังตารางที่ ก.1 ถึงตารางที่ ก. 10

- ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

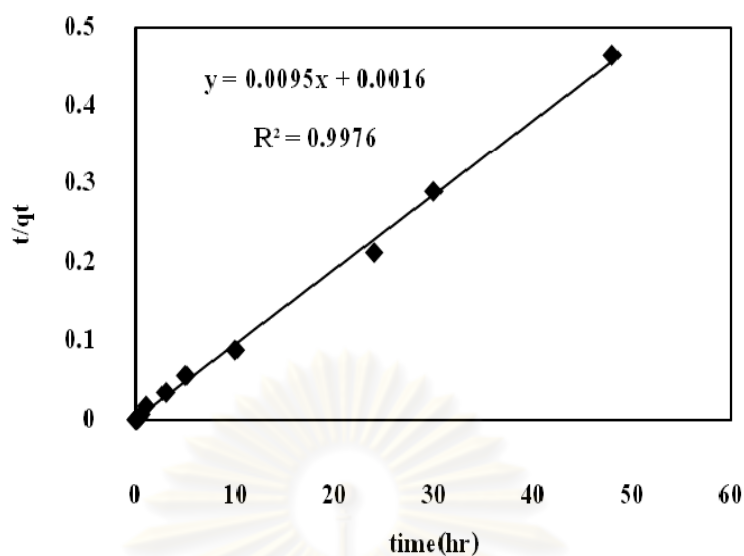
เมื่อ  $k_2$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)

$q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมมูล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  ดังรูปที่ ก.2 จะสามารถคำนวณหาค่า  $k_2$  ได้จากค่าจุดตัดแกนตั้ง และค่าคงที่  $q_e$  ได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรง



รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  สำหรับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากสมการ  $y = 0.0095x + 0.0016$  มีค่าจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ 0.0016 และค่าความชันของกราฟเส้นตรงเท่ากับ 0.0095 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า  $q_e$  และค่าคงที่  $k_2$  ได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \text{ความชันของกราฟเส้นตรง}$$

$$= 0.0095$$

ดังนั้น  $q_e = 105.26$  มิลลิกรัมต่อกรัม

สามารถหาค่าคงที่  $k_2$  ได้จากจุดตัดแกนตั้งโดยที่

$$\frac{1}{2k_2q_e^2} = \text{จุดตัดแกนตั้ง}$$

$$k_2 = \frac{1}{2(0.0016)(105.26)^2}$$

$$= 0.028 \text{ กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง}$$

ข้อมูลการคำนวณค่า  $\frac{t}{q_t}$  ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมการดูดซับสาร PFOS และ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ที่พีเอช 7 แสดงดังตารางที่ ก.1 ถึงตารางที่ ก. 10



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	65.3955	112.9687	103.2785	2.2711	0.4648
30	0.100	0.30	65.3863	112.9687	103.3061	2.2683	0.2904
24	0.100	0.30	62.1655	112.9687	112.9687	-13.5379	0.2124
10	0.100	0.30	62.1922	112.9687	112.8886	-2.5250	0.0886
5	0.100	0.30	70.2544	112.9687	88.7019	3.1891	0.0564
3	0.100	0.30	71.1102	112.9687	86.1345	3.2897	0.0348
1	0.100	0.30	80.9228	112.9687	56.6969	4.0302	0.0176
0.5	0.100	0.30	75.9659	112.9687	71.5675	3.7233	0.0070
0.25	0.100	0.30	68.9431	112.9687	92.6360	3.0122	0.0027
0.0833	0.100	0.30	73.8710	112.9687	77.8523	3.5587	0.0011
0	0.100	0.30	99.8217	112.9687	0.0000	4.7271	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	89.7283	24.5017	21.6968	1.0313	2.2123
30	0.100	0.30	90.7250	24.5017	18.7066	1.7570	1.6037
24	0.100	0.30	88.7933	24.5017	24.5017	-11.1952	0.9795
10	0.100	0.30	86.3818	24.5017	31.7363	-	0.3151
5	0.100	0.30	89.1719	24.5017	23.3658	0.1274	0.2140
3	0.100	0.30	84.0568	24.5017	38.7113	-	0.0775
1	0.100	0.30	83.9123	24.5017	39.1447	-	0.0255
0.5	0.100	0.30	85.3908	24.5017	34.7092	-	0.0144
0.25	0.100	0.30	79.7259	24.5017	51.7039	-	0.0048
0.0833	0.100	0.30	79.8843	24.5017	51.2287	-	0.0016
0	0.100	0.30	96.9605	24.5017	0.0000	3.1987	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	50.9009	152.4015	153.2020	-	0.3133
30	0.100	0.30	50.3033	152.4015	154.9946	-	0.1936
24	0.100	0.30	51.1677	152.4015	152.4015	-	0.1575
10	0.100	0.30	55.6550	152.4015	138.9396	2.5999	0.0720
5	0.100	0.30	53.7158	152.4015	144.7573	2.0339	0.0345
3	0.100	0.30	50.8445	152.4015	153.3711	-	0.0196
1	0.100	0.30	51.3481	152.4015	151.8603	-0.6140	0.0066
0.5	0.100	0.30	55.7568	152.4015	138.6341	2.6223	0.0036
0.25	0.100	0.30	56.5897	152.4015	136.1356	2.7891	0.0018
0.0833	0.100	0.30	52.2704	152.4015	149.0935	1.1963	0.0006
0	0.100	0.30	101.9682	152.4015	0.0001	5.0265	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	87.5433	20.0350	28.5020	-	1.6841
30	0.100	0.30	89.5389	20.0350	22.5152	-	1.3324
24	0.100	0.30	90.3657	20.0350	20.0348	-8.7459	1.1979
10	0.100	0.30	93.7105	20.0350	10.0004	2.3060	1.0000
5	0.100	0.30	90.8468	20.0350	18.5917	0.3669	0.2689
3	0.100	0.30	89.1781	20.0350	23.5976	-	0.1271
1	0.100	0.30	89.7569	20.0350	21.8613	-	0.0457
0.5	0.100	0.30	92.6624	20.0350	13.1449	1.9301	0.0380
0.25	0.100	0.30	91.1651	20.0350	17.6367	0.8747	0.0142
0.0833	0.100	0.30	92.7086	20.0350	13.0062	1.9500	0.0064
0	0.100	0.30	97.0441	20.0350	-0.0002	2.9975	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	59.0209	114.9447	114.1148	-0.1865	0.4206
30	0.100	0.30	63.1650	114.9447	101.6827	2.5849	0.2950
24	0.100	0.30	58.7443	114.9447	114.9447	-12.7119	0.2088
10	0.100	0.30	61.5140	114.9447	106.6356	2.1174	0.0938
5	0.100	0.30	55.6355	114.9447	124.2709	-	0.0402
3	0.100	0.30	60.3308	114.9447	110.1850	1.5602	0.0272
1	0.100	0.30	64.0667	114.9447	98.9774	2.7705	0.0101
0.5	0.100	0.30	57.9290	114.9447	117.3907	-	0.0043
0.25	0.100	0.30	60.8865	114.9447	108.5181	1.8604	0.0023
0.0833	0.100	0.30	58.3544	114.9447	116.1143	-	0.0007
0	0.100	0.30	97.0592	114.9447	0.0000	4.7445	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	90.3796	29.0061	29.0060	-	-
30	0.100	0.30	96.6848	29.0061	10.0904	2.9400	2.9731
24	0.100	0.30	95.3497	29.0061	14.0959	2.7020	1.7026
10	0.100	0.30	94.8864	29.0061	15.4858	2.6042	0.6458
5	0.100	0.30	91.0779	29.0061	26.9113	-	0.1858
3	0.100	0.30	93.9780	29.0061	18.2108	2.3791	0.1647
1	0.100	0.30	89.3888	29.0061	31.9784	-	0.0313
0.5	0.100	0.30	90.8097	29.0061	27.7157	-	0.0180
0.25	0.100	0.30	90.2348	29.0061	29.4405	-	0.0085
0.0833	-	-	-	-	-	-	-
0	0.100	0.30	100.0483	29.0061	0.0000	3.3675	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	83.0247	52.1268	52.1267	-	0.9208
30	0.100	0.30	86.2548	52.1268	42.4366	2.2711	0.7069
24	0.100	0.30	86.8758	52.1268	40.5736	2.4470	0.5915
10	0.100	0.30	86.6132	52.1268	41.3613	2.3763	0.2418
5	0.100	0.30	87.7885	52.1268	37.8353	2.6597	0.1322
3	0.100	0.30	85.5004	52.1268	44.6997	2.0051	0.0671
1	0.100	0.30	80.6241	52.1268	59.3287	-	0.0169
0.5	0.100	0.30	77.2231	52.1268	69.5315	-	0.0072
0.25	0.100	0.30	77.9400	52.1268	67.3809	-	0.0037
0.0833	0.100	0.30	77.4315	52.1268	68.9063	-	0.0012
0	0.100	0.30	100.4003	52.1268	0.0000	3.9537	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	89.9850	25.0443	25.9821	-	1.8474
30	0.100	0.30	90.2975	25.0443	25.0443	-	1.1979
24	-	-	-	-	-	-	-
10	0.100	0.30	91.2520	25.0443	22.1810	1.0520	0.4508
5	0.100	0.30	89.2806	25.0443	28.0951	-	0.1780
3	0.100	0.30	89.1222	25.0443	28.5703	-	0.1050
1	0.100	0.30	91.1686	25.0443	22.4311	0.9606	0.0446
0.5	0.100	0.30	94.7529	25.0443	11.6782	2.5927	0.0428
0.25	0.100	0.30	100.8963	25.0443	-6.7518	3.4593	-0.0370
0.0833	0.100	0.30	97.8204	25.0443	2.4757	3.1166	0.0336
0	0.100	0.30	98.6456	25.0443	0.0000	3.2206	0.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_e$	$q_t$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	17.4907	548.9045	558.5635	-	0.0859
30	0.100	0.30	17.7162	548.9045	558.1170	-	0.0538
24	0.100	0.30	16.9017	548.9045	559.7299	-	0.0429
10	0.100	0.30	22.3685	548.9045	548.9045	-	0.0182
5	0.100	0.30	23.2797	548.9045	547.1003	0.5901	0.0091
3	0.100	0.30	31.4753	548.9045	530.8713	2.8922	0.0057
1	0.100	0.30	45.7590	548.9045	502.5868	3.8355	0.0020
0.5	0.100	0.30	45.4460	548.9045	503.2065	3.8221	0.0010
0.1670	0.100	0.30	55.0038	548.9045	484.2803	4.1686	0.0003
0.0830	0.100	0.30	60.4200	548.9045	473.5551	4.3221	0.0002
0.0330	0.100	0.30	47.8021	548.9045	498.5410	3.9193	0.0001
0	0.100	0.30	299.5653	548.9045	0.0001	6.3079	0.0000

ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 7

Time (hrs)	weight (g)	Volume (l)	Ce (mg/l)	$q_c$	$q_t$	$\ln(q_c - q_t)$	$t/q_t$
48	0.100	0.30	72.6846	458.5574	449.2687	2.2288	0.1068
30	0.100	0.30	72.5719	458.5574	449.4919	2.2045	0.0667
24	0.100	0.30	67.9938	458.5574	458.5574	-16.6389	0.0523
10	0.100	0.30	75.4322	458.5574	443.8279	2.6898	0.0225
5	0.100	0.30	67.2865	458.5574	459.9580	-	0.0109
3	0.100	0.30	84.4406	458.5574	425.9894	3.4833	0.0070
1	0.100	0.30	90.3245	458.5574	414.3382	3.7892	0.0024
0.5	0.100	0.30	100.2812	458.5574	394.6220	4.1579	0.0013
0.1670	0.100	0.30	120.8669	458.5574	353.8582	4.6511	0.0005
0.0830	0.100	0.30	139.3541	458.5574	317.2500	4.9509	0.0003
0.0330	0.100	0.30	152.1322	458.5574	291.9467	5.1157	0.0001
0	0.100	0.30	299.5653	458.5574	0.0001	6.1281	0.0000

ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (q)

- ประสิทธิภาพการดูดซับ PFOS โดยใช้ตัวกลางดูดซับ SCP ที่พีเอช 5 สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

เมื่อ	q	= ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$C_0$	= ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$C_e$	= ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	m	= ปริมาณตัวกลางดูดซับ (กรัม)
	V	= ปริมาตรสารละลาย (ลิตร)

จากการทดลองที่ค่า  $C_0$  เท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวกลางดูดซับ 0.01 กรัม ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ได้ค่า  $C_e$  เท่ากับ 15.24 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับ ได้ดังนี้

$$q = \frac{(25 - 15.24)0.03}{0.01}$$

$$q = 28.42 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสาร PFOS และ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ที่พีเอช 5, 7 และ 9 แสดงดังตารางที่ ก.11 ถึงตารางที่ ก. 40

### ตัวอย่างการคำนวณ ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

- ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์สำหรับการดูดซับ PFOS โดยใช้ตัวกลางดูดซับ SCP ที่พีเอช 5 สามารถคำนวณได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ดังสมการ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{bq_m} \frac{1}{C_e}$$

เมื่อ  $q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น  $C_e$   
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

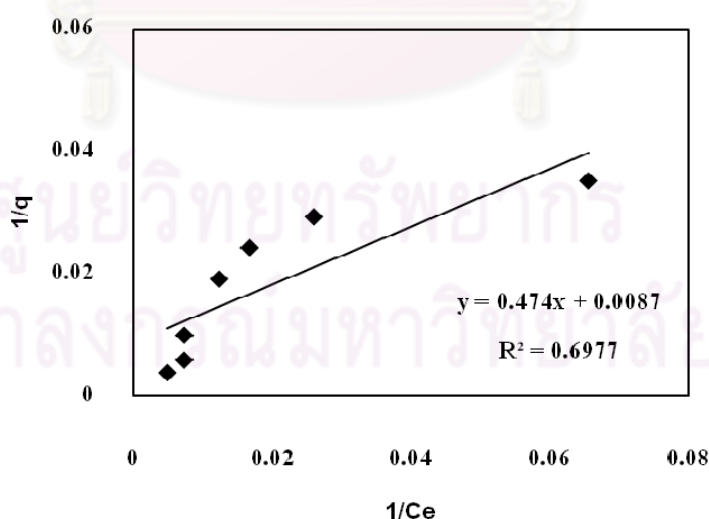
$q_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับมากที่สุดต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียง ชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$b$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงาน

โดยเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C_e}$  ดังรูปที่ ก.3 จะสามารถคำนวณหา

ค่า  $\frac{1}{q_m}$  ได้จากค่าจุดตัดแกนตั้ง และค่า  $\frac{1}{bq_m}$  ได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรง



รูปที่ ก.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C_e}$  สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์



จากสมการ  $y = 0.474x + 0.0087$  มีค่าจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ 0.0087 และค่าความชันของกราฟเส้นตรงเท่ากับ 0.474 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด  $q_m$  และค่าคงที่  $b$  ได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_m} = \text{จุดตัดแกนตั้ง}$$

$$= 0.0087$$

ดังนั้น

$$q_m = \frac{1}{0.0087}$$

$$= 114.94 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

สามารถหาค่าคงที่  $b$  ได้จากความชันของกราฟเส้นตรง โดยที่

$$\frac{1}{bq_m} = \text{ความชันของกราฟเส้นตรง}$$

$$= 0.474$$

ดังนั้น

$$b = (0.0087) / (0.474)$$

$$= 0.0184$$

ผลการคำนวณค่า  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C_e}$  สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสาร PFOS และ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ที่พีเอช 5, 7 และ 9 แสดงดังตารางที่ ก. 11 ถึงตารางที่ ก. 40

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

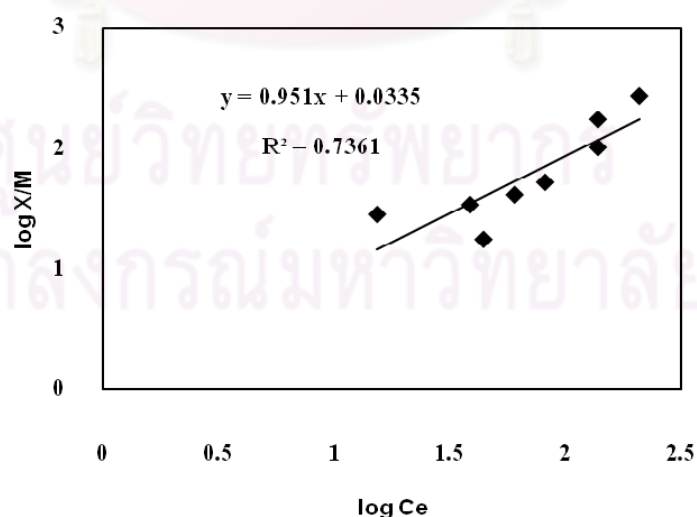
### ตัวอย่างการคำนวณ ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

- ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนด์ลิชสำหรับการดูดซับ PFOS โดยใช้ตัวกลางดูพีเอช 5 สามารถคำนวณได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชดังสมการ

$$\log\left(\frac{X}{M}\right) = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

- เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $X$  = ปริมาณของสารที่ดูดซับ (มิลลิกรัม)  
 $M$  = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $K_f$  = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ  
 $1/n$  = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration dependence)

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log \frac{X}{M}$  และ  $\log C_e$  ดังรูปที่ ก.4 สามารถหาค่า  $K_f$  และ  $1/n$  ได้โดยที่  $1/n$  เป็นค่าความชันของกราฟ และ  $\log K_f$  คือจุดตัดแกนตั้ง



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log \frac{X}{M}$  และ  $\log C_e$  สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

จากสมการ  $y = 0.951x + 0.0335$  มีค่าจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ 0.0335 และค่าความชันของกราฟเส้นตรงเท่ากับ 0.951 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า  $K_f$  และ  $1/n$  ได้ดังนี้

$$1/n = \text{ความชันของกราฟ}$$

ดังนั้น  $1/n = 0.951$

สามารถหาค่าคงที่  $\log K_f$  ได้จากค่าจุดตัดแกนตั้งโดยที่

$$\log K_f = \text{ค่าจุดตัดแกนตั้ง}$$

$$= 0.0335$$

ดังนั้น  $K_f = 1.080$

ผลการคำนวณค่า  $\log \frac{X}{M}$  และ  $\log C_e$  สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพุนด์ลิชของการดูดซับสาร PFOS และ PFOA ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ที่พีเอช 5, 7 และ 9 แสดงดังตารางที่ ก.11 ถึงตารางที่ ก. 40

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
0.0103	0.03	25	15.2438	28.4161	0.0656	0.0352	1.1831	1.4536
0.0101	0.03	50	38.4960	34.1704	0.0260	0.0293	1.5854	1.5337
0.0108	0.03	75	60.1268	41.3144	0.0166	0.0242	1.7791	1.6161
0.0106	0.03	100	81.4660	52.4548	0.0123	0.0191	1.9110	1.7198
0.0107	0.03	200	138.1064	173.5335	0.0072	0.0058	2.1402	2.2394
0.0101	0.03	300	208.6255	271.4093	0.0048	0.0037	2.3194	2.4336

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
0.0103	0.03	25	20.2594	13.8076	0.0494	0.0724	1.3066	1.1401
0.0111	0.03	50	41.0696	24.1361	0.0243	0.0414	1.6135	1.3827
0.0110	0.03	75	64.0754	29.7944	0.0156	0.0336	1.8067	1.4741
0.0104	0.03	100	77.3877	65.2278	0.0129	0.0153	1.8887	1.8144
0.0106	0.03	200	165.7406	96.9606	0.0060	0.0103	2.2194	1.9866
0.0105	0.03	300	265.3987	98.8609	0.0038	0.0101	2.4239	1.9950

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0105	0.03	25	21.2531	10.7055	0.0471	0.0934	1.3274	1.0296
0.0099	0.03	50	37.6635	37.3833	0.0266	0.0267	1.5759	1.5727
0.0103	0.03	75	46.3277	83.5115	0.0216	0.0120	1.6658	1.9217
0.0110	0.03	100	65.2991	94.6389	0.0153	0.0106	1.8149	1.9761
0.0101	0.03	200	76.5145	366.7886	0.0131	0.0027	1.8837	2.5644
0.0099	0.03	300	111.0276	572.6436	0.0090	0.0017	2.0454	2.7579

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0103	0.03	25	26.1589	0.0000	0.0382	-	1.4176	-
0.0103	0.03	50	40.7932	26.8159	0.0245	0.0373	1.6106	1.4284
0.0108	0.03	75	63.0617	33.1619	0.0159	0.0302	1.7998	1.5206
0.0101	0.03	100	87.2013	38.0158	0.0115	0.0263	1.9405	1.5800
0.0099	0.03	200	180.4280	59.3092	0.0055	0.0169	2.2563	1.7731
0.0097	0.03	300	273.9900	75.0681	0.0037	0.0102	2.4288	1.9898

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0097	0.03	25	17.4714	23.2844	0.0572	0.0429	1.2423	1.3671
0.0104	0.03	50	28.2519	62.7349	0.0354	0.0159	1.4510	1.7975
0.0103	0.03	75	44.7205	88.1927	0.0224	0.0113	1.6505	1.9454
0.0107	0.03	100	61.7289	107.3022	0.0162	0.0093	1.7905	2.0306
0.0101	0.03	200	93.2865	316.9707	0.0107	0.0032	1.9698	2.5010
0.0106	0.03	300	144.1278	441.1477	0.0069	0.0023	2.1587	2.6446

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0100	0.03	25	25.3601	0.0000	0.0394	-	1.4042	-
0.0103	0.03	50	46.3497	10.6320	0.0216	0.0941	1.6660	1.0266
0.0109	0.03	75	67.9593	19.3780	0.0147	0.0516	1.8322	1.2873
0.0103	0.03	100	93.1769	19.8732	0.0107	0.0503	1.9693	1.2983
0.0109	0.03	200	192.1912	21.4922	0.0052	0.0465	2.2837	1.3323
0.0104	0.03	300	289.6995	29.7130	0.0035	0.0337	2.4619	1.4729

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.17 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0102	0.03	25	21.6636	9.8129	0.0462	0.1019	1.3357	0.9918
0.0108	0.03	50	37.5395	34.6126	0.0266	0.0289	1.5745	1.5392
0.0106	0.03	75	54.8629	56.9919	0.0182	0.0175	1.7393	1.7558
0.0103	0.03	100	68.6945	91.1811	0.0146	0.0110	1.8369	1.9599
0.0105	0.03	200	124.1565	216.6957	0.0081	0.0046	2.0940	2.3359
0.0104	0.03	300	209.4175	261.2956	0.0048	0.0038	2.3210	2.4171

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0101	0.03	25	21.8824	9.2602	0.0457	0.1080	1.3401	0.9666
0.0106	0.03	50	41.0709	25.2711	0.0243	0.0396	1.6135	1.4026
0.0104	0.03	75	66.1927	25.4056	0.0151	0.0394	1.8208	1.4049
0.0104	0.03	100	86.5250	38.8703	0.0116	0.0257	1.9371	1.5896
0.0101	0.03	200	181.6648	54.4610	0.0055	0.0184	2.2593	1.7361
0.0100	0.03	300	273.0472	80.8584	0.0037	0.0124	2.4362	1.9077

ศูนย์วทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0098	0.03	25	18.4617	20.0153	0.0542	0.0500	1.2663	1.3014
0.0101	0.03	50	33.6183	48.6586	0.0297	0.0206	1.5266	1.6872
0.0102	0.03	75	42.7461	94.8643	0.0234	0.0105	1.6309	1.9771
0.0103	0.03	100	50.5762	143.9527	0.0198	0.0069	1.7039	2.1582
0.0100	0.03	150	89.1681	182.4958	0.0112	0.0055	1.9502	2.2613
0.0103	0.03	200	135.5460	187.7300	0.0074	0.0053	2.1321	2.2735
0.0105	0.03	300	207.3953	264.5847	0.0048	0.0038	2.3168	2.4226

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0099	0.03	25	21.2149	11.4701	0.0471	0.0872	1.3266	1.0596
0.0102	0.03	50	43.6025	18.8163	0.0229	0.0531	1.6395	1.2745
0.0101	0.03	75	67.0687	23.5585	0.0149	0.0424	1.8265	1.3721
0.0102	0.03	100	90.2192	28.7672	0.0111	0.0348	1.9553	1.4589
0.0100	0.03	200	186.9928	39.0216	0.0053	0.0256	2.2718	1.5913
0.0107	0.03	300	285.7959	39.8246	0.0035	0.0251	2.4561	1.6002

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ A-SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	Q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0104	0.03	15	26.4092	0.0000	0.0379	-	1.4218	-
0.0105	0.03	25	27.2887	0.0000	0.0366	-	1.4360	-
0.0107	0.03	50	33.3828	46.5904	0.0300	0.0215	1.5235	1.6683
0.0104	0.03	75	49.9604	72.2298	0.0200	0.0138	1.6986	1.8587
0.0104	0.03	100	56.3337	125.9604	0.0178	0.0079	1.7508	2.1002
0.0102	0.03	200	99.3541	295.1492	0.0101	0.0034	1.9972	2.4700
0.0105	0.03	300	152.0363	422.7535	0.0066	0.0024	2.1819	2.6261

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ A-SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0100	0.03	25	24.7789	0.6632	0.0404	1.5078	1.3941	-0.1784
0.0101	0.03	50	49.8042	0.5815	0.0201	1.7195	1.6973	-0.2354
0.0101	0.03	75	73.8445	3.4321	0.0135	0.2914	1.8683	0.5356
0.0102	0.03	100	92.7047	21.4568	0.0108	0.0466	1.9671	1.3316
0.0107	0.03	200	185.9476	39.3993	0.0054	0.0254	2.2694	1.5955
0.0103	0.03	300	281.8170	52.9602	0.0035	0.0189	2.4500	1.7239

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0100	0.03	25	18.9906	18.0281	0.0527	0.0555	1.2785	1.2560
0.0101	0.03	50	40.6382	27.8073	0.0246	0.0360	1.6089	1.4442
0.0107	0.03	75	63.7986	31.4058	0.0157	0.0318	1.8048	1.4970
0.0107	0.03	100	79.9082	56.3321	0.0125	0.0178	1.9026	1.7508
0.0104	0.03	200	155.1013	129.5154	0.0064	0.0077	2.1906	2.1123
0.0105	0.03	300	230.2498	199.2862	0.0043	0.0050	2.3622	2.2995

ตารางที่ ก.24 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0104	0.03	25	21.7823	9.2817	0.0459	0.1077	1.3381	0.9676
0.0101	0.03	50	45.3312	13.8677	0.0221	0.0721	1.6564	1.1420
0.0106	0.03	75	67.6925	20.6816	0.0148	0.0484	1.8305	1.3156
0.0097	0.03	100	90.6927	28.7855	0.0110	0.0347	1.9576	1.4592
0.0100	0.03	200	185.8764	42.3708	0.0054	0.0236	2.2692	1.6271
0.0100	0.03	300	275.0904	74.7288	0.0036	0.0134	2.4395	1.8735

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.25 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0111	0.03	25	19.6135	14.5580	0.0510	0.0687	1.2926	1.1631
0.0104	0.03	50	34.2224	45.5122	0.0292	0.0220	1.5343	1.6581
0.0100	0.03	75	42.0898	98.7306	0.0238	0.0101	1.6242	1.9945
0.0100	0.03	150	107.6468	127.0595	0.0093	0.0079	2.0320	2.1040
0.0104	0.03	200	146.1039	155.4694	0.0068	0.0064	2.1647	2.1916
0.0101	0.03	300	208.1734	272.7523	0.0048	0.0037	2.3184	2.4358

ตารางที่ ก.26 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0102	0.03	15	9.8711	0.0000	0.1013	-	0.9944	-
0.0100	0.03	25	18.4977	19.5070	0.0541	0.0513	1.2671	1.2902
0.0103	0.03	50	41.4753	24.8292	0.0241	0.0403	1.6178	1.3950
0.0105	0.03	75	64.7386	29.3184	0.0154	0.0341	1.8112	1.4671
0.0102	0.03	100	88.7910	32.9675	0.0113	0.0303	1.9484	1.5181
0.0102	0.03	200	185.5647	42.4568	0.0054	0.0236	2.2685	1.6279
0.0106	0.03	300	283.2403	47.4331	0.0035	0.0211	2.4522	1.6761

ตารางที่ ก.27 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ M-SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0103	0.03	25	18.1776	19.8711	0.0550	0.0503	1.2595	1.2982
0.0103	0.03	50	38.8756	32.4012	0.0257	0.0309	1.5897	1.5106
0.0110	0.03	75	54.2788	56.5125	0.0184	0.0177	1.7346	1.7521
0.0101	0.03	100	62.1991	112.2798	0.0161	0.0089	1.7938	2.0503
0.0105	0.03	200	103.6389	275.3174	0.0096	0.0036	2.0155	2.4398
0.0101	0.03	300	208.3671	272.1768	0.0048	0.0037	2.3188	2.4349

ตารางที่ ก.28 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ M-SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0100	0.03	25	22.9661	6.1018	0.0435	0.1639	1.3611	0.7855
0.0101	0.03	50	44.3069	16.9103	0.0226	0.0591	1.6465	1.2282
0.0101	0.03	75	63.6777	33.6305	0.0157	0.0297	1.8040	1.5267
0.0102	0.03	100	87.5357	36.6598	0.0114	0.0273	1.9422	1.5642
0.0107	0.03	200	180.2678	55.3239	0.0055	0.0181	2.2559	1.7429
0.0103	0.03	300	279.7123	59.0904	0.0036	0.0169	2.4467	1.7715

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.29 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0102	0.03	25	20.8950	12.0735	0.0479	0.0828	1.3200	1.0818
0.0106	0.03	50	44.4024	15.8424	0.0225	0.0631	1.6474	1.1998
0.0102	0.03	75	63.0437	35.1656	0.0159	0.0284	1.7996	1.5461
0.0100	0.03	100	86.4110	40.7670	0.0116	0.0245	1.9366	1.6103
0.0108	0.03	200	166.1399	94.0559	0.0060	0.0106	2.2205	1.9734
0.0105	0.03	300	253.5704	132.6561	0.0039	0.0075	2.4041	2.1227

ตารางที่ ก.30 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0107	0.03	25	23.3846	4.5291	0.0428	0.2208	1.3689	0.6560
0.0104	0.03	50	45.8794	11.8863	0.0218	0.0841	1.6616	1.0750
0.0101	0.03	75	69.5959	16.0519	0.0144	0.0623	1.8426	1.2055
0.0100	0.03	100	93.8025	18.5926	0.0107	0.0538	1.9722	1.2693
0.0108	0.03	200	184.7846	42.2649	0.0054	0.0237	2.2667	1.6260
0.0104	0.03	300	281.1586	54.3502	0.0036	0.0184	2.4490	1.7352

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.31 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0106	0.03	25	21.0963	11.0482	0.0474	0.0905	1.3242	1.0433
0.0101	0.03	50	42.6432	21.8518	0.0235	0.0458	1.6299	1.3395
0.0100	0.03	75	61.3283	41.0150	0.0163	0.0244	1.7877	1.6129
0.0110	0.03	100	82.5515	47.5870	0.0121	0.0210	1.9167	1.6775
0.0103	0.03	200	130.0009	203.8810	0.0077	0.0049	2.1139	2.3094
0.0104	0.03	300	193.4368	307.3940	0.0052	0.0033	2.2865	2.4877

ตารางที่ ก.32 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0111	0.03	25	22.2384	7.4638	0.0450	0.1340	1.3471	0.8730
0.0100	0.03	50	42.5161	22.4516	0.0235	0.0445	1.6286	1.3512
0.0102	0.03	75	66.1572	26.0084	0.0151	0.0384	1.8206	1.4151
0.0105	0.03	100	89.6851	29.4712	0.0112	0.0339	1.9527	1.4694
0.0108	0.03	200	185.4889	40.3087	0.0054	0.0248	2.2683	1.6054
0.0104	0.03	300	259.4505	116.9697	0.0039	0.0085	2.4141	2.0681

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.33 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ OD-SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0102	0.03	25	20.0592	14.5317	0.0499	0.0688	1.3023	1.1623
0.0106	0.03	50	38.0967	33.6886	0.0262	0.0297	1.5809	1.5275
0.0102	0.03	75	58.1383	49.5932	0.0172	0.0202	1.7645	1.6954
0.0100	0.03	100	63.7395	108.7816	0.0157	0.0092	1.8044	2.0366
0.0108	0.03	200	111.6556	245.4012	0.0090	0.0041	2.0479	2.3899
0.0105	0.03	300	161.4533	395.8477	0.0062	0.0025	2.2080	2.5975

ตารางที่ ก.34 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ OD-SCP ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0100	0.03	25	23.2376	5.2873	0.0430	0.1891	1.3662	0.7232
0.0099	0.03	50	44.0620	17.9938	0.0227	0.0556	1.6441	1.2551
0.0101	0.03	75	67.5522	22.1220	0.0148	0.0452	1.8296	1.3448
0.0100	0.03	100	88.8556	33.4333	0.0113	0.0299	1.9487	1.5242
0.0100	0.03	200	182.5525	52.3425	0.0055	0.0191	2.2614	1.7189
0.0101	0.03	300	284.0343	47.4230	0.0035	0.0211	2.4534	1.6760

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.35 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
0.0109	0.03	25	0.0000	68.8073	-	0.0145	-	1.8376
0.0113	0.03	75	0.0000	199.1150	-	0.0050	-	2.2991
0.0113	0.03	100	17.8046	218.2178	0.0562	0.0046	1.2505	2.3389
0.0114	0.03	200	78.1261	320.7207	0.0128	0.0031	1.8928	2.5061
0.0102	0.03	300	172.2022	375.8760	0.0058	0.0027	2.2360	2.5750

ตารางที่ ก.36 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 5

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
0.0109	0.03	25	0.0000	68.8073	-	0.0145	-	1.8376
0.0110	0.03	75	10.9813	169.9612	0.0911	0.0059	1.0407	2.2304
0.0112	0.03	100	23.3392	203.5243	0.0428	0.0049	1.3681	2.3086
0.0114	0.03	200	90.3011	288.6813	0.0111	0.0035	1.9557	2.4605
0.0101	0.03	300	195.0808	308.5859	0.0051	0.0032	2.2902	2.4894

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.37 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0108	0.03	25	0.0000	68.8073	-	0.0145	-	1.8376
0.0105	0.03	75	3.8909	188.7853	0.2570	0.0053	0.5900	2.2760
0.0108	0.03	100	14.9584	225.7741	0.0669	0.0044	1.1749	2.3537
0.0103	0.03	200	110.2236	264.0483	0.0091	0.0038	2.0423	2.4217
0.0109	0.03	300	179.8269	316.2451	0.0056	0.0032	2.2549	2.5000

ตารางที่ ก.38 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 7

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0107	0.03	25	0.0000	68.8073	-	0.0145	-	1.8376
0.0101	0.03	75	12.7343	165.3071	0.0785	0.0060	1.1050	2.2183
0.0102	0.03	100	35.5163	171.1957	0.0282	0.0058	1.5504	2.2335
0.0103	0.03	200	110.8570	234.5869	0.0090	0.0043	2.0448	2.3703
0.0107	0.03	300	203.0559	285.1297	0.0049	0.0035	2.3076	2.4550

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.39 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOS ของ PAC ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0103	0.03	25	0.0357	68.7090	27.9966	0.0146	-1.4471	1.8370
0.0105	0.03	75	9.9652	172.6586	0.1003	0.0058	0.9985	2.2372
0.0104	0.03	100	19.4621	213.8173	0.0514	0.0047	1.2892	2.3300
0.0100	0.03	200	95.1329	275.9661	0.0105	0.0036	1.9783	2.4409
0.0101	0.03	300	190.0612	323.3495	0.0053	0.0031	2.2789	2.5097

ตารางที่ ก.40 ข้อมูลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ PFOA ของ PAC ที่พีเอช 9

weight (g)	Volume (l)	$C_0$ (mg/l)	$C_e$ (mg/l)	q (mg/g)	$1/C_e$	1/q	$\log C_e$	$\log q$
0.0103	0.03	25	0.0000	68.8073	-	0.0145	-	1.8376
0.0108	0.03	75	8.4666	176.6374	0.1181	0.0057	0.9277	2.2471
0.0104	0.03	100	29.7784	186.4291	0.0336	0.0054	1.4739	2.2705
0.0105	0.03	200	81.8555	310.9066	0.0122	0.0032	1.9130	2.4926
0.0100	0.03	300	176.2830	363.8735	0.0057	0.0027	2.2462	2.5610

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการประยุกต์ใช้นุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก  
ในการกำจัดความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ SCP (0.2 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)

pH 2	เวลา (นาที)			pH 3	เวลา (นาที)			pH 4	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1290	14.6	6.9	ความขุ่น (NTU)	1287	45	30	ความขุ่น (NTU)	1318	57	47
	1293	13.8	6.7		1281	46	29		1320	55	41
	1297	14.2	6.7		1279	42	32		1324	53	44
	1295	14.3	6.2		1284	45	32		1327	55	44
Avg.	1293.75	14.23	6.63	Avg.	1282.75	44.50	30.75	Avg.	1322.25	55	44
SD	2.99	0.33	0.30	SD	3.50	1.73	1.50	SD	4.03	1.63	2.45

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ SCP (0.2 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)

pH 5	เวลา (นาที)			pH 7	เวลา (นาที)			pH 9	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1306	71	53	ความขุ่น (NTU)	1265	78	56	ความขุ่น (NTU)	1278	76	55
	1301	74	59		1268	81	59		1283	74	53
	1299	72	52		1275	79	58		1284	71	57
	1302	77	62		1270	82	57		1277	75	55
Avg.	1302	73.50	56.50	Avg.	1269.50	80	57.50	Avg.	1280.50	74	55
SD	2.94	2.65	4.80	SD	4.20	1.826	1.29	SD	3.51	2.16	1.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ SCP (0.2 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)

pH 12	เวลา (นาที)		
	0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1285	81	56
	1280	79	54
	1279	78	54
	1289	78	53
Avg.	1283.25	79	54.25
SD	4.65	1.41	1.26

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP (0.1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)

pH 2	เวลา (นาที)			pH 3	เวลา (นาที)			pH 4	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	819	3.5	1.8	ความขุ่น (NTU)	715	6.8	3.9	ความขุ่น (NTU)	735	2.7	2.3
	809	4.2	1.6		711	10.1	6.8		730	3.3	2.2
	808	3.4	2		720	8.2	4.8		738	5.1	2
	812	3.7	2.1		718	8.3	4.5		734	6.3	2.1
Avg.	812	3.70	1.88	Avg.	716	8.35	5	Avg.	734.25	4.35	2.15
SD	4.97	0.36	0.22	SD	3.92	1.35	1.26	SD	3.30	1.65	0.13

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP (0.1 กรัมต่อ100 มิลลิลิตร)

pH 5	เวลา (นาที)			pH 7	เวลา (นาที)			pH 9	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	813	6.4	3.7	ความขุ่น (NTU)	768	6.9	1.1	ความขุ่น (NTU)	771	18	12.8
	813	6.7	3.8		764	6.7	1.1		776	20	12.9
	809	7.2	4.6		760	7.1	1.2		768	20	12.5
	814	7	4.4		762	7	1.1		765	20	12.7
Avg.	812.25	6.83	4.13	Avg.	763.50	6.93	1.13	Avg.	770	19.50	12.73
SD	2.22	0.35	0.44	SD	3.42	0.17	0.05	SD	4.69	1	0.17

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP (0.1 กรัมต่อ100 มิลลิลิตร)

pH 12	เวลา (นาที)		
	0	30	60
ความขุ่น (NTU)	832	24	15
	835	27	15.8
	838	30	15.2
	830	24	15
Avg.	833.75	26.25	15.25
SD	3.50	2.87	0.38

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนกรณีที่ไม่ใช้แรงแม่เหล็กในการแยกอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

SCP pH 2	เวลา (นาที)			M-SCP pH 7	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	763	156	135	ความขุ่น (NTU)	841	182	165
	765	152	136		842	180	166
	763	157	137		840	184	161
	760	157	135		842	187	161
Avg.	762.75	155.50	135.75	Avg.	841.25	183.25	163.25
SD	2.06	2.38	0.96	SD	0.96	2.99	2.63

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ SCP (พีเอช 2 ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

0.05 กรัม	เวลา (นาที)			0.1 กรัม	เวลา (นาที)			0.2 กรัม	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	406	5.1	3.4	ความขุ่น (NTU)	792	14.2	5.5	ความขุ่น (NTU)	1290	14.6	6.9
	404	5.2	3.5		781	14.2	5.3		1293	13.8	6.7
	404	5.4	3.4		770	14.4	5.3		1297	14.2	6.7
	403	5.1	3.6		779	14	5.1		1295	14.3	6.2
Avg.	404.25	5.2	3.475	Avg.	780.5	14.2	5.3	Avg.	1293.75	14.225	6.625
SD	1.258	0.141	0.096	SD	9.037	0.163	0.163	SD	2.986	0.330	0.299

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ SCP (พีเอช 2 ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

0.4 กรัม	เวลา (นาที)			0.6 กรัม	เวลา (นาที)			0.8 กรัม	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1587	47	47	ความขุ่น (NTU)	3688	67	28.5	ความขุ่น (NTU)	5901	41	29
	1595	47	45		3675	64	29.3		5893	36.8	29
	1592	47	47		3679	67	33.7		5907	46	32
	1585	47	47		3681	72	31		5892	44	29
Avg.	1589.75	47	46.50	Avg.	3680.75	67.50	30.63	Avg.	5898.25	41.95	29.75
SD	4.57	0	1	SD	5.44	3.32	2.30	SD	7.09	4.00	1.50

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ M-SCP (พีเอช 7 ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

0.05 กรัม	เวลา (นาที)			0.1 กรัม	เวลา (นาที)			0.2 กรัม	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	380	14.1	5.3	ความขุ่น (NTU)	768	6.9	1.1	ความขุ่น (NTU)	1448	15.4	9.6
	378	14	6.5		765	6.7	1.1		1446	15.4	9.6
	387	10.1	4.4		760	7.1	1.2		1444	15.5	8.9
	382	11.7	4.4		762	7	1.1		1442	15.1	10.6
Avg.	381.75	12.48	5.15	Avg.	763.75	6.93	1.13	Avg.	1445	15.35	9.68
SD	3.862	1.93	1	SD	3.50	0.17	0.05	SD	2.58	0.17	0.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข.5 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ของ M-SCP (พีเอช 7 ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

0.4 กรัม	เวลา (นาที)			0.6 กรัม	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	3440	19.1	13.8	ความขุ่น (NTU)	4810	13.3	13
	3460	19.7	13.8		4940	13.5	12.3
	3440	18.4	13.7		4980	13	11.3
	3530	18.5	13.6		4860	13.3	11
Avg.	3467.50	18.93	13.73	Avg.	4897.50	13.28	11.90
SD	42.72	0.60	0.10	SD	76.76	0.21	0.92

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการทดสอบผลของปริมาณของ PFOS ต่อความสามารถในการตกตะกอนของ SCP (พีเอช 2 ปริมาณ 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

SCP	PFOS 100 mg/l			PFOS 200 mg/l			PFOS 300 mg/l		
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที
ความขุ่น (NTU)	811	43	31	817	33	33	817	40	40
	815	43	27	815	36	39	816	45	47
	819	43	28	808	39	36	812	46	41
	812	42	28	814	38	42	820	46	36
Avg.	814.25	42.75	28.50	813.50	36.50	37.50	816.25	44.25	41
SD	3.59	0.50	1.73	3.87	2.65	3.87	3.30	2.87	4.55

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลการทดสอบผลของปริมาณของ PFOS ต่อความสามารถในการตกตะกอนของ M-SCP (พีเอช 7 ปริมาณ 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร)

M-SCP	PFOS 100 mg/l			PFOS 200 mg/l			PFOS 300 mg/l		
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที
ความขุ่น (NTU)	896	12.7	5.3	921	12.6	11.6	879	16.5	11.2
	902	12.2	4.2	927	12.4	11.6	884	14.8	9.7
	904	12.8	4.4	924	12.5	7.4	877	18.7	10.2
	900	13.2	5.1	932	11.3	8.2	888	18.3	10.8
Avg.	900.50	12.73	4.75	926	12.20	9.70	882	17.08	10.48
SD	3.42	0.41	0.53	4.69	0.61	2.22	4.97	1.79	0.66

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่น 100 NTU ที่พีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร

pH 2	เวลา (นาที)			pH 3	เวลา (นาที)			pH 4	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	108	77	60	ความขุ่น (NTU)	101	70	64	ความขุ่น (NTU)	105	103	101
	108	80	63		107	76	66		109	107	102
	105	81	60		105	73	61		102	102	101
	107	79	61		105	74	63		102	105	103
Avg.	107	79.25	61	Avg.	104.50	73.25	63.50	Avg.	104.50	104.25	101.75
SD	1.41	1.71	1.41	SD	2.52	2.50	2.08	SD	3.32	2.22	0.96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.8 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่น 100 NTU ที่พีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร

pH 5	เวลา (นาที)			pH 7	เวลา (นาที)			pH 9	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	107	104	93	ความขุ่น (NTU)	101	95	96	ความขุ่น (NTU)	104	102	96
	103	99	94		104	95	97		104	104	101
	106	101	89		103	94	96		106	106	94
	106	105	86		102	97	99		106	102	95
Avg.	105.50	102.25	90.50	Avg.	102.50	95.25	97	Avg.	105	103.50	96.50
SD	1.73	2.75	3.70	SD	1.29	1.26	1.41	SD	1.16	1.92	3.11

ตารางที่ ข.8 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่น 100 NTU ที่พีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร

pH 12	เวลา (นาที)		
	0	30	60
ความขุ่น (NTU)	101	99	92
	108	96	94
	104	94	96
	104	92	92
Avg.	104.25	95.25	93.50
SD	2.87	2.99	1.92

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลการทดสอบผลของปริมาณความขุ่นต่อความสามารถในการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร

pH 2	100 NTU			200 NTU			300 NTU			400 NTU		
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที
ความขุ่น (NTU)	108	77	60	202	181	86	310	184	78	408	159	72
	108	80	63	204	184	88	301	182	81	405	156	74
	105	81	60	210	186	89	304	183	84	397	160	73
	107	79	61	207	186	90	303	184	84	409	161	73
Avg.	107	79.25	61	205.75	184.25	88.25	304.50	183.25	81.75	404.75	159	73
SD	1.41	1.71	1.41	4.97	1.79	0.66	4.69	0.61	2.22	4.97	1.79	0.66

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ SCP 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU

pH 2	เวลา (นาที)			pH 3	เวลา (นาที)			pH 4	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1252	86	16.2	ความขุ่น (NTU)	1202	225	219	ความขุ่น (NTU)	1195	435	385
	1248	89	14.4		1197	220	222		1201	442	392
	1250	84	17.1		1204	218	214		1197	440	384
	1254	90	17		1210	215	217		1190	445	387
Avg.	1251	87.25	16.18	Avg.	1203.25	219.50	218	Avg.	1195.75	440.50	387
SD	2.58	2.75	1.25	SD	5.38	4.20	3.37	SD	4.57	4.20	3.56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.10 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ SCP 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร  
 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU

pH 5	เวลา (นาที)			pH 7	เวลา (นาที)			pH 9	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1278	370	356	ความขุ่น (NTU)	1172	397	96	ความขุ่น (NTU)	1217	102	401
	1272	373	362		1169	404	97		1221	104	404
	1284	377	351		1164	392	96		1225	106	404
	1282	374	355		1171	394	99		1229	102	408
Avg.	1279	373.50	356	Avg.	1169	396.75	97	Avg.	1223	103.50	404.25
SD	5.29	2.89	4.55	SD	3.56	5.25	1.41	SD	5.16	1.92	2.87

ตารางที่ ข.10 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ SCP 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร  
 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU

pH 12	เวลา (นาที)		
	0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1265	478	420
	1273	485	422
	1276	474	418
	1270	477	416
Avg.	1271	478.50	419
SD	4.69	4.66	2.58

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP 0.1 กรัมกรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร

ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU

pH 2	เวลา (นาที)			pH 3	เวลา (นาที)			pH 4	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1346	77	51	ความขุ่น (NTU)	1442	195	156	ความขุ่น (NTU)	1384	315	256
	1340	77	52		1433	192	159		1380	311	260
	1348	79	49		1442	196	155		1388	313	256
	1350	76	49		1436	197	155		1390	320	257
Avg.	1346	77.25	50.25	Avg.	1438.25	195	156.25	Avg.	1385.50	314.75	257.25
SD	4.32	1.26	1.50	SD	4.50	2.16	1.89	SD	4.44	3.86	1.89

ตารางที่ ข.11 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP 0.1 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร

ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU

pH 5	เวลา (นาที)			pH 7	เวลา (นาที)			pH 9	เวลา (นาที)		
	0	30	60		0	30	60		0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1372	288	272	ความขุ่น (NTU)	1343	351	336	ความขุ่น (NTU)	1425	363	344
	1377	286	262		1335	356	332		1416	363	331
	1387	283	266		1336	347	328		1422	363	334
	1379	280	280		1340	359	337		1428	365	339
Avg.	1378.75	284.25	270	Avg.	1338.50	353.25	333.25	Avg.	1422.75	363.50	337
SD	6.24	3.50	7.83	SD	3.70	5.32	4.11	SD	5.12	1	5.72

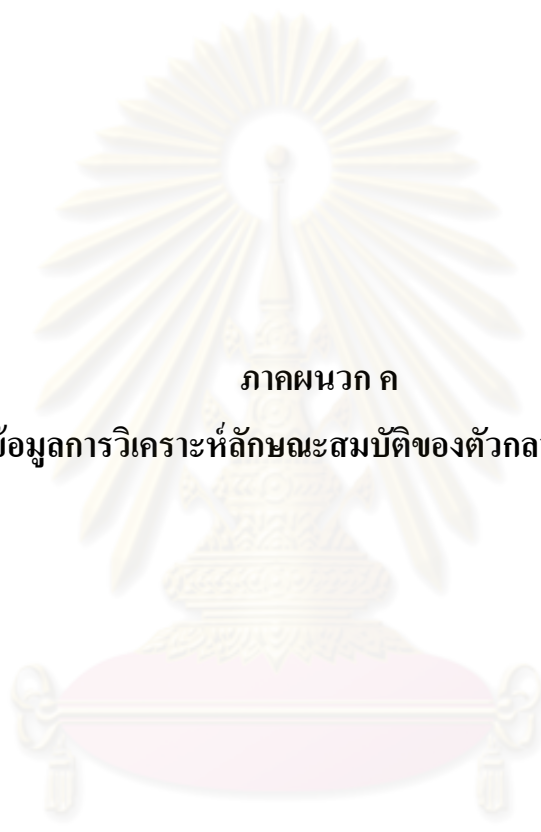


ตารางที่ ข.11 (ต่อ) ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนความขุ่นที่พีเอชต่างๆ ของ M-SCP 0.1 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร  
ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 400 NTU

pH 12	เวลา (นาที)		
	0	30	60
ความขุ่น (NTU)	1558	398	340
	1565	404	337
	1565	406	342
	1554	395	348
Avg.	1560.50	400.75	341.75
SD	5.45	5.12	4.65

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการใส่อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในการกำจัดความขุ่น  
จากน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ที่มีความขุ่น 400 NTU และมีสาร PFOS 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH 2	SCP 0.1 กรัม			M-SCP 0.1 กรัม		
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	0 นาที	30 นาที	60 นาที
ความขุ่น (NTU)	1229	82	35	1251	59	41
	1235	78	38	1248	64	42
	1230	80	30	1256	64	51
	1233	80	32	1255	66	49
Avg.	1231.75	80	33.75	1252.50	63.25	45.75
SD	2.75	1.63	3.50	3.70	2.99	4.99



ภาคผนวก ค  
ข้อมูลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวกลางดูดซับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การหาปริมาณไนโตรเจน

ปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิวของอนุภาค วิเคราะห์โดยใช้การดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) โดยทำการย่อยตัวกลางดูดซับด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ ) ในสภาวะที่เป็นด่างในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclave) โดยค่าไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

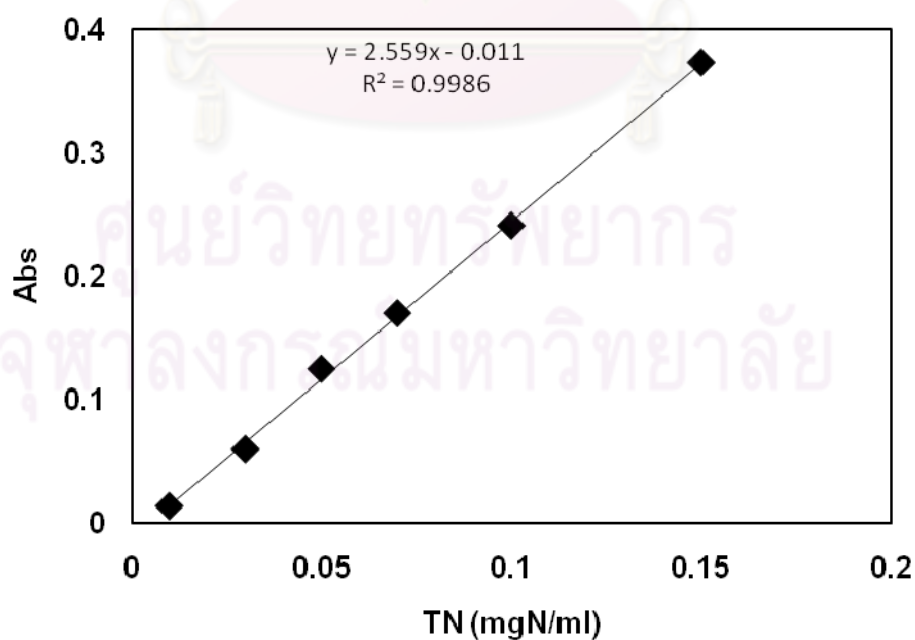
$$TN \text{ (mg/g)} = [a \times (60/25)] / b$$

โดยที่

- a = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม)
- b = ปริมาณตัวกลางดูดซับ (กรัม)

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการทดสอบปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิว

Adsorbent	Abs	conc.N (mgN/ml)	Weight (g)	TN (mg/g)	TN (g/g)	%N
A-SCP 1	0.056	0.2618	0.0501	12.5423	0.01254	1.2542
A-SCP 2	0.045	0.2188	0.0502	10.4623	0.01046	1.0462



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานไนโตรเจน

### ข้อมูลการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว

ค.2 ข้อมูลการหาค่าประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด

SCP		A-SCP		M-SCP		OD-SCP	
pH	C/g	pH	C/g	pH	C/g	pH	C/g
4.14	30.77302	5.1	46.33399	3.9	17.87844	3.66	7.24304
4.45	15.41108	6.02	23.66053	4.27	11.05857	3.6	-12.227
5.6	11.45747	6.86	12.04668	4.82	8.411193	3.58	-38.9408
6.11	2.228338	7.5	2.481161	5.47	1.59575	3.58	-49.4161
6.35	-2.51486	8.02	-2.16218	6.01	-2.64579	3.55	-64.2951
6.65	-11.8684	8.56	-10.9679	6.31	-11.937	3.57	-64.1388
6.79	-23.6757	9.03	-21.1178	7.33	-23.6125	3.59	-71.9158
7.43	-48.194	9.47	-41.1303	8.33	-47.7353	3.6	-83.8854
7.43	0.052308	7.8	0.138687	6.94	-0.00625	3.59	-102.093

ค.3 ข้อมูลการหาค่าประจุบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

PAC	
pH	C/g
6.59	46.794
6.62	23.605
6.73	11.911
6.75	2.292
6.81	-2.434
6.94	-12.07
7.01	-23.885
7.07	-46.387
6.87	-0.014



ภาคผนวก ง  
หลักการวิเคราะห์โดยเครื่อง TOC

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### หลักการวิเคราะห์

ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TC) ในน้ำจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ (Organic Carbon) และสารอนินทรีย์ (Inorganic Carbon) ดังนั้นในการหาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำสามารถหาได้จาก  $TOC = TC - IC$

### หลักการวิเคราะห์ TC (Total Carbon)

ในเครื่อง TOC-VcpH Carrier gas จะถูกควบคุมด้วย Pressure regulator และชุดควบคุมอัตราการไหล Carrier gas จะไหลที่อัตรา 150 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าไปยัง Combustion tube ซึ่งถูกเติมด้วย Oxidation catalyst และถูกทำความร้อนถึงอุณหภูมิ 680 °C ค่า TC ของน้ำตัวอย่างจะถูกเผาใน Combustion tube กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ Carrier gas ที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสิ่งที่ได้จากการเผาไหม้อื่นๆ จะไหลจาก Combustion tube ไปยัง Dehumidifier ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิและกำจัดน้ำ (Dehydrate) จากนั้นจะผ่านไปยัง Halogen scrubber ก่อนจะไปถึง cell ของ NDIR gas analyzer ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับของ NDIR ในรูปของค่า Peak และพื้นที่ของ Peak จะถูกวัดด้วย Data processor

Peak area จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของ TC ในน้ำตัวอย่าง ดังนั้นเมื่อน้ำยามาตรฐาน TC ถูกวิเคราะห์เพื่อทำ Calibration curve หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TC และ Peak area ดังนั้นปริมาณ TC ในน้ำตัวอย่างจึงสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์เดียวกัน เครื่อง TOC-VcpH แสดงดังรูปที่ ง.1

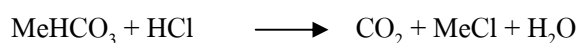
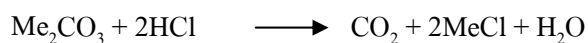


รูปที่ ง.1 เครื่อง TOC-VcpH

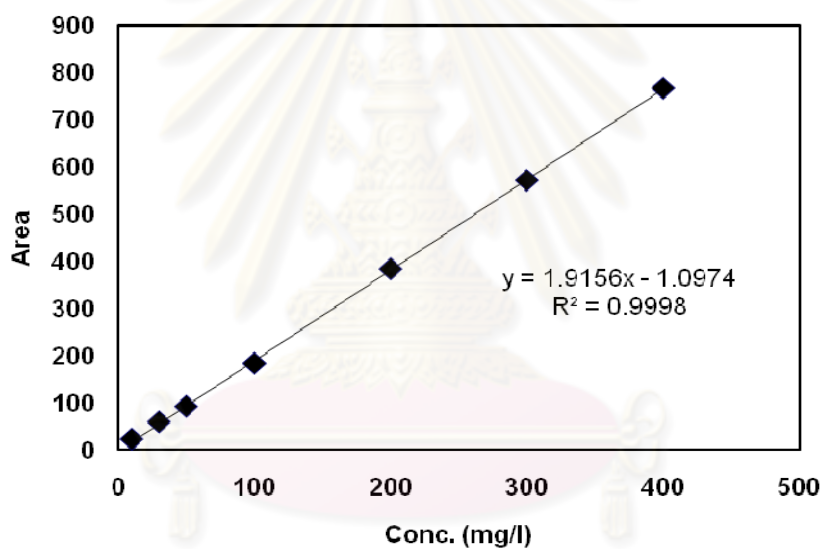


### หลักการวิเคราะห์ IC (Inorganic Carbon)

IC ในการวิเคราะห์ TOC หมายถึงคาร์บอนที่มีในคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำและพบในรูปของคาร์บอเนต การเติมกรดแก่ลงไปในตัวอย่างสารคาร์บอเนตทั้งหมดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการดังนี้

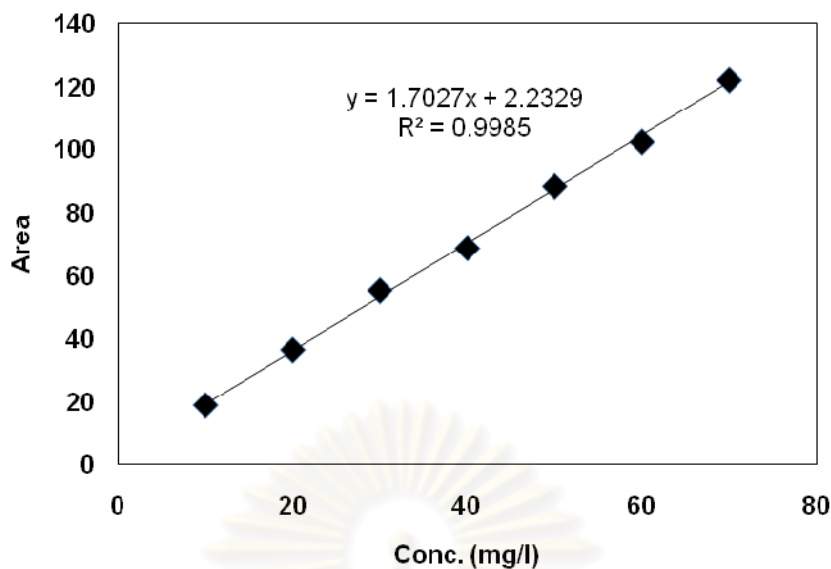


ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำตัวอย่างสามารถระเหยได้ด้วยการ Sparging ด้วยอากาศหรือก๊าซที่ไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง



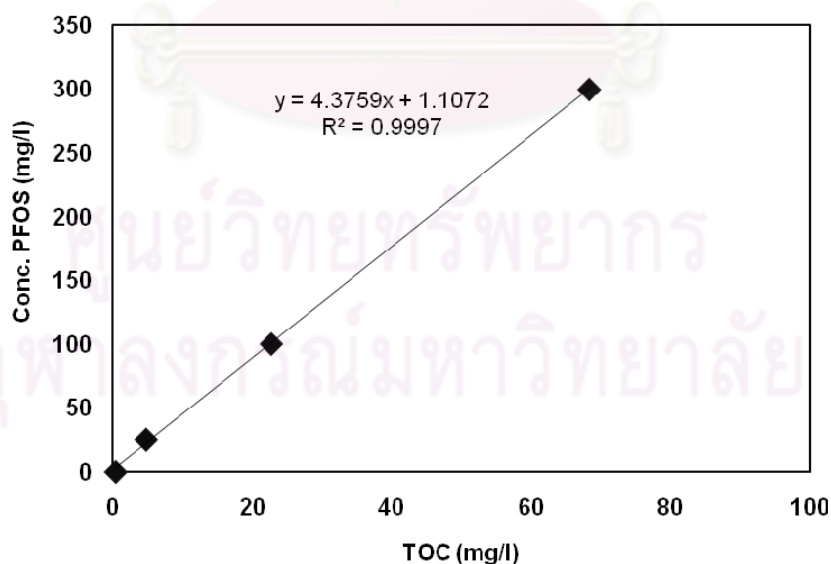
รูป ง. 2 กราฟมาตรฐาน TC

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

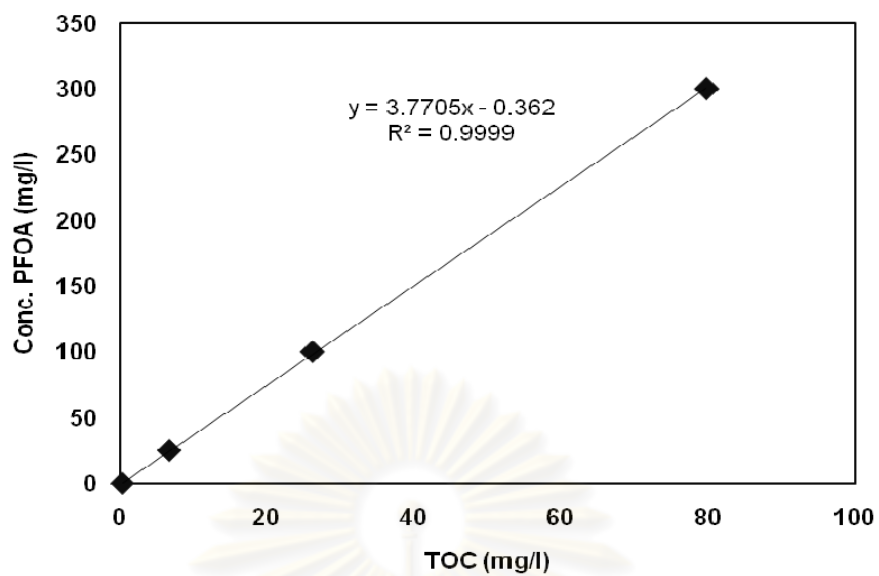


รูป ง. 3 กราฟมาตรฐาน IC

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนทโดยการวิเคราะห์ TOC ต้องมีการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อทำการสอบเทียบปริมาณของสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนทในการวัดแต่ละครั้ง โดยกราฟมาตรฐานเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนทที่ใช้ในแต่ละความเข้มข้นและปริมาณ TOC ที่วิเคราะห์ได้โดยเครื่อง ตัวอย่างกราฟมาตรฐานในการทดลองครั้งนี้แสดงดังรูปที่ ง.4 - ง.5



รูปที่ ง.4 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PFOS ต่อปริมาณ TOC



รูปที่ ๓.5 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PFOA ต่อปริมาณ TOC

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิชามณูชू พัตร์ชนม์ เกิดวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550



ศูนย์วิทยพัธ์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย