

การดูดซับไตรฮาโลมีเทนโดยมีไซพอร์สซิลิเกต

นางสาวพัชราภรณ์ วิวัฒน์พงศ์เพชร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

ADSORPTION OF TRIHALOMETHANES BY MESOPOROUS SILICATES

Miss Patcharaporn Vivattanapongpetch

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับไตรฮาโลมีเทนโดยมีไซพอร์สซิลิเกต

โดย

นางสาวพัชราภรณ์ วิวัฒน์พงศ์เพชร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ชัชลิดา ศรีอำภาพร)

พัชราภรณ์ วิวัฒน์พงศ์เพชร : การดูดซับไตรฮาโลมีเทนโดยมีโซพอร์สซิลิเกต.
(ADSORPTION OF TRIHALOMETHANES (THMS) BY MESOPOROUS SILICATES)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกตและดัดแปรพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแบบเดี่ยว ได้แก่ 3-aminopropyltriethoxy- 3-mercaptopropyl- และ n-octyldimethyl- และแบบคู่ระหว่าง 3-aminopropyltriethoxy- และ 3-mercaptopropyl เพื่อศึกษาผลของการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes: THMs) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์และประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3), ไดคลอโรโบรโมมีเทน (CHBrCl_2), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (CHBr_2Cl) และไตรโบรโมมีเทน (CHBr_3) ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-500 ไมโครกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 7 และค่าความแรงประจุ 0.01 โมลาร์ และทำการศึกษาผลกระทบของโครงสร้างของ THMs ที่แตกต่างกันต่อสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของตัวกลางดูดซับในสารละลายทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม จากผลการทดลองพบว่า หมู่ 3-mercaptopropyl- บนมีโซพอร์สซิลิเกต มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด อัตราเร็วในการดูดซับของตัวกลางดูดซับชนิดไม่ชอบน้ำมีค่าสูงกว่าตัวกลางดูดซับชนิดชอบน้ำ โครงสร้างของสาร THMs ที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือก ซึ่งสารประกอบกลุ่มโบรโมมีเทน มีแนวโน้มในการถูกดูดซับโดยหมู่ M-HMS ได้ดีกว่าสารประกอบกลุ่มคลอโรมีเทน กลไกการดูดซับสาร THMs คาดว่าเกิดจากแรงทางประจุไฟฟ้าระหว่างไอออนและคู่ขั้ว (Ion-dipole electrostatic force) นอกจากนี้ สารอิเล็กโตรไลต์ในน้ำประปาไม่ส่งผลต่อสมบัติการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต ในขณะที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับของ PAC โดยทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ THMs ลดลง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2554

5170404921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / TRIHALOMETHANE / HEXAGONAL MESOPOROUS SILICATE / SURFACE FUNCTIONAL GROUP

PATCHARAPORN VIVATTANAPONGPETCH : ADSORPTION OF TRIHALOMETHANES (THMs) BY MESOPOROUS SILICATES. ADVISOR : ASST. PROF. PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 134 pp.

In this study, adsorption efficiencies of trihalomethanes (THMs), disinfection by product (DBPs), by using synthesized hexagonal mesoporous silicates (HMSs) were investigated. HMSs were synthesized and modified surface with single-functional groups (3-aminopropyltriethoxy-, 3-mercaptopropyl- and n-octyldimethyl-) and bi-functional groups of 3-aminopropyltriethoxy- and 3-mercaptopropyl- to investigate the effect of surface functional group on adsorption efficiency and mechanism compared with powder activated carbon (PAC). Kinetics and adsorption isotherm of 4 types of THMs (CHCl_3 , CHBrCl_2 , CHBr_2Cl and CHBr_3) at low concentration (0-500 $\mu\text{g/L}$) were investigated at pH 7 and ionic strength 0.01 M. In addition, the effect of molecular structure of THMs on selective adsorption in single and mixed solute solutions was also investigated. For obtained data, 3-mercaptopropyl- grafted HMS had highest adsorption rate and capacity of the four THMs. Adsorption rate of hydrophobic adsorbents was higher than hydrophilic adsorbents. The different molecular structure of THMs affected the adsorption capacity and selectivity. Adsorption capacities of bromohalomethane group on 3-mercaptopropyl- grafted HMS were higher than chlorohalomethane group. The adsorption mechanism is believed to occur via an ion-dipole electrostatic interaction. Moreover, the effect of electrolyte in tap water did not affect the adsorption capacity and selective on organic functionalized HMS whereas that affected the adsorption capacity over PAC.

Department : Environmental Engineering... Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัย มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ ดร. ชัชชิตา ศรีธัญญาพร และดร.พรเพ็ญ จิตติวุฒินนท์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิฉัน แก้ไข ให้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งาน ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes ,THMs).....	5
2.2 มีโซพอร์สซิติลิต.....	14
2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิติลิต.....	22
2.4 สมบัติทางกายภาพและเคมีของมีโซพอร์สซิติลิตชนิดต่างๆ.....	30
2.5 การดูดซับ.....	39
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
.	
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	54
3.2 แผนการทดลอง.....	55
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	57

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	72
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	72
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ ในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน.....	72
4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน	79
4.4 การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน.....	91
4.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนตาม มาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก.....	98
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของสารไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด.....	9
2.2	ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาตามเกณฑ์ที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก	9
2.3	ศึกษาการเกิดมะเร็งจากไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นจากการเติมคลอรีน โดยทำการทดลองใส่ตัว.....	11
2.4	ศึกษาการเกิดมะเร็งจากไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นจากการเติมคลอรีน.....	11
2.5	อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวต่อซิลิเกต.....	17
2.6	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์ซิลิเกต.....	19
2.7	แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในมีโซพอร์ซิลิเกต	28
2.8	ชนิดของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	31
2.9	พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ...	33
2.10	ค่า pHZPC และค่าความชอบน้ำ (Water contact angle) ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	38
2.11	สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	39
3.1	ตัวแปรในการศึกษาจลนศาสตร์ของไตรฮาโลมีเทน บนพื้นผิวของสารตัวกลางดูดซับ.....	64
3.2	ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน.....	65
3.3	ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน...	67
3.4	ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อควบคุมพีเอชเท่ากับ7.....	69
3.5	ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อเติมไอออน.....	70
4.1	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	72
4.2	ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	76
4.3	ค่าคงที่กลไกการดูดซับคลอโรฟอร์มโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค.....	79
4.4	ค่าการกระจายตัวของประจุ (Dipole Charges) ในโมเลกุลของไตรฮาโลมีเทน...	80

4.5	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของไตรฮาโลมีเทน ด้วยตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกตและ PAC.....	88
4.6	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไตรฮาโลมีเทน ด้วยตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5, 7 และ 9.....	91
4.7	สมบัติของน้ำประปาและความเข้มข้นของอิเล็คโตรไลต์ในน้ำประปาที่ใช้ในการทดลอง.....	95
4.8	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไตรฮาโลมีเทน โดยเปรียบเทียบสมบัติการคัดเลือกในน้ำกลั่นและในน้ำประพากับแบบเดี่ยว.....	97

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	7
2.2	ประเภทและลักษณะของมีโซพอร์สชนิดต่างๆ.....	16
2.3	ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ HMS, OD-HMS, A-HMS, M-HMS และ A5M5-HMS.....	32
2.4	ไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ (a) HMS, Ti-HMS, OD-HMS, A-HMS และ M-HMS (b) PAC.....	33
2.5	สเปกตรัม FT-IR แสดงหมู่ฟังก์ชันของ HMS, A-HMS, M-HMS และ OD-HMS	35
2.6	ขนาดอนุภาคและสัญญาณวิทยาของตัวกลางดูดซับ (a) HMS; (b) A-HMS; (c) M-HMS.....	36
2.7	ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีโซพอร์สชนิดต่างๆ และ PAC.....	37
3.1	แผนการทดลองในการดำเนินการวิจัย.....	56
3.2	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต (HMS).....	57
3.3	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดด้วย n-octyldimethylchlorosilane (OD-HMS).....	58
3.4	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดด้วย 3-mercaptopropyltrimethoxy.....	59
3.5	โครงสร้างของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่เมอร์แคปโต(M-HMS).	60
3.6	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติด 3-aminopropyltriethoxy (A-HMS).....	60
3.7	โครงสร้างของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโน(AM-HMS).....	61
3.8	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่.....	61
3.9	การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไธฮาโลมีเทน	62
4.1	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับคลอโรฟอร์มของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±20c.....	73
4.2	จลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มโดยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือน.....	74

ภาพที่		หน้า
4.3	กลไกการดูดซับคลอโรฟอร์มโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค.....	78
4.4	แสดงภาพจำลองการเกิดแรงระหว่างไอออนกับประจุตรงข้ามที่อยู่ในโมเลกุลของมลสาร.....	80
4.5	ความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ของตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±20c เวลา 24 ชั่วโมงควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±2 ⁰ c เวลา 2 ชั่วโมง.....	82
4.6	ความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ของตัวกลางดูดซับ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±20c เวลา 24 ชั่วโมง.....	84
4.7	เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนต่อความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±2 ⁰ c เวลา 24 ชั่วโมง.....	86
4.8	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ TCM ของตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±20c เวลา 24 ชั่วโมง.....	90
4.9	ความสามารถในการดูดซับ THM4 ในน้ำกลั่น ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±20c เวลา 24 ชั่วโมง.....	92
4.10	ความสามารถในการดูดซับ THM4 ในน้ำประปาจริง ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม อุณหภูมิ 25±20c เวลา 24 ชั่วโมง.....	96
4.11	การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนตามมาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด มนุษย์เองก็เช่นกันมีความจำเป็นต้องใช้น้ำในการประกอบกิจกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกิจวัตรประจำวัน การอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม การพักผ่อน และอื่นๆ แหล่งน้ำที่ใช้สำหรับการอุปโภคบริโภคของประชากรในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ได้มาจากแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญในการผลิตน้ำประปา ซึ่งในน้ำดิบจะมีความขุ่น สี สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่อยู่ในรูปละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และอาจมีเชื้อโรคปนเปื้อน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนที่จะส่งจ่ายไปยังผู้บริโภค สำหรับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในโรงผลิตน้ำประปาเริ่มตั้งแต่ การดักเศษสกปรกขนาดใหญ่ด้วยตะแกรง, การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น, การรวมตะกอนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน, การตกตะกอน, การกรองผ่านชั้นทรายและการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วขั้นตอนการผลิตน้ำประปาทั่วไปไม่มุ่งเน้นในการลดสารอินทรีย์ในน้ำ แต่เน้นการกำจัดความขุ่น เพื่อให้ได้น้ำที่ดูใสสะอาดและปราศจากเชื้อโรค ขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคมักจะนิยมใช้สารประกอบคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค ซึ่งสามารถก่อให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products, DBPs) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับคลอรีนอิสระ โดยสารพลอยได้เหล่านี้มีด้วยกันหลายกลุ่ม เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs), ฮาโลอะซิติกแอซิด (Haloacetic acids, HAAs), ฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) และอื่นๆ (Marhaba และ Washington, 1998) ส่วนกลุ่มที่พบบ่อยที่สุดคือ สารในกลุ่ม THMs ซึ่งไตรฮาโลมีเทนที่พบบ่อยในน้ำประปามี 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3 , TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (CHBrCl_2 , BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (CHBr_2Cl , DBCM) และโบรโมฟอร์ม (CHBr_3 , TBM)

จากการศึกษาน้ำจากท่อน้ำประปาบริเวณรอบกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2548 พบว่า มีค่าความเข้มข้นของสารไตรฮาโลมีเทนอยู่ในช่วง 40-115 ไมโครกรัมต่อลิตร (วรพจน์ กนกกันตพงษ์ และคณะ, 2549) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) พบว่า มีหลายช่วงเวลาที่น้ำประปามีไตรฮาโลมีเทน เจือปนอยู่ในระดับสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของสหรัฐอเมริกาซึ่งกำหนดไว้ที่ 80

ไม่โครกรัมต่อลิตร (USEPA, 2010) แสดงให้เห็นว่า ผู้บริโภคน้ำประปามีโอกาสเสี่ยงต่อการได้รับสารตกค้างเหล่านี้ในระดับที่เกินค่ามาตรฐาน สารในกลุ่มไตรฮาโลมีเทนมีส่วนในการเพิ่มการเกิดมะเร็งที่ตับและไตกับสัตว์ในห้องทดลอง (Fawell, 2000) นอกจากนี้ยังมีรายงานกล่าวไว้ว่าการบริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนสารไตรฮาโลมีเทน อาจเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งในกระเพาะปัสสาวะได้ (WHO, 2005; Yang et al., 1998)

มีโซพอร์สซิลิเกตสามารถดูดซับมลสารขนาดเล็ก และยังมีความสามารถในการดูดซับสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคชนิดฮาโลอะซีติกแอซิด (Punyapalukul et al., 2009) มีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ตัวกลางดูดซับชนิดนี้ในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนออกจากน้ำ เพื่อลดอัตราการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งและโรคอื่นๆ ที่เกิดจากการดื่มน้ำที่มีสารตกค้างต่างๆ จากการฆ่าเชื้อโรค งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทน โดยการปรับปรุงพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตเป็นตัวกลางในการดูดซับ ทำการศึกษาเพื่อทราบประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของสารประกอบไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดบนพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแบบต่างๆ ศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อการดูดซับ ศึกษาสมบัติการคัดเลือกของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และศึกษาผลของไอออนในน้ำประปาต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3 , TCM), ไดคลอโรโบรโมมีเทน (CHBrCl_2 , BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (CHBr_2Cl , DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (CHBr_3 , TBM) บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาคุณสมบัติการคัดเลือกของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และผลกระทบของอิเล็กโตรไลต์ในน้ำประปาต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 สังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ มีโซพอร์สซิลิเกต และทำการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีทั้งแบบหมู่ฟังก์ชันเดี่ยว และ 2 หมู่ฟังก์ชัน โดยหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ ได้แก่ หมู่เมอร์แคปโต (3-mercaptopropyl-), หมู่อะมิโน (3-aminopropyltriethoxy-) และหมู่ ออกทิล (n-octyldimethyl-)
- 1.3.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์และทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยการทดลองแบบที่ละเท ใช้สารละลายสังเคราะห์ ทำการศึกษาการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM)
- 1.3.3 ศึกษาผลของพีเอชที่ 5 7 และ 9 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด โดยควบคุมความแรงประจุที่ 0.01 M ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติในการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับโดยใช้สารละลายผสมของไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด (THM_4) ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น และศึกษาผลกระทบของอิเล็กโตรไลต์ในน้ำประปาโดยใช้น้ำประปาจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประเมินประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ตัวกลางดูดซับ ชนิดมีโซพอร์สซิลิเกตร่วมกับตัวดูดซับอื่นๆ ในการกำจัดไตรฮาโลมีเทนจากน้ำประปาตามบ้านเรือนจากข้อมูลดังต่อไปนี้

- 1.4.1 ประเมินประสิทธิภาพและความสัมพันธ์ของโครงสร้างโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกต ในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน
- 1.4.2 ทราบอัตราเร็วของการดูดซับและเวลาที่เข้าสู่สมดุล
- 1.4.3 ทราบผลกระทบของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน
- 1.4.4 ทราบความสามารถในการคัดเลือกในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน
- 1.4.5 ทราบผลกระทบของอิเล็กโทรไลต์ในน้ำประปาที่มีต่อการดูดซับไตรฮาโลมีเทนของตัวกลางชนิดต่างๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

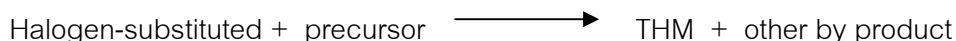
2.1 ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes ,THMs)

สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes ,THMs) คือสารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารฮาโลเจนกับสารอินทรีย์ มีสูตรทั่วไปคือ CHX_3 โดยที่ X อาจเป็นฟลูออรีน (F), คลอรีน (Cl), โบรมีน (Br), ไอโอดีน (I) หรือธาตุเหล่านี้รวมกัน ในน้ำประปามักจะประกอบด้วยสาร 4 ตัวได้แก่ Bromoform ($CHBr_3$, TBM), Dibromochloromethane ($CHBr_2Cl$, DBCM), Chloroform ($CHCl_3$, TCM) และ Bromodichloromethane ($CHBrCl_2$, BDCM)

2.1.1 การเกิดไตรฮาโลมีเทน

1. ปฏิกิริยาการเกิดไตรฮาโลมีเทน

สารไตรฮาโลมีเทนเกิดจากธาตุฮาโลเจน (หมู่ 7) ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น กรดฮิวมิก (aquatic humic substance,AHS) หรือสารอินทรีย์จากซากพืชซากสัตว์ต่างๆ ที่เน่าเปื่อยอยู่ในน้ำ เป็นต้น



โดยที่สารฮาโลเจนจะไปทำให้สารอินทรีย์สลายตัว และแทนที่อะตอมของธาตุไฮโดรเจนของมีเทน (methane) ซึ่งสารไตรฮาโลมีเทนที่พบส่วนใหญ่มักเกิดจากคลอรีน (Cl_2) และโบรมีน (Br_2)

2. การเกิดไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา

ในกระบวนการผลิตน้ำประปา สารไตรฮาโลมีเทนจะเกิดขึ้นจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยคลอรีนเกิดเป็นสารพลอยได้ (disinfection by product) โดยที่คลอรีนหรือโบรมีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (precursors) เช่น ส่วนประกอบจากสาหร่าย คือ chlorophyll-a, algae biomass, extra cellular product, โปรตีน, สารอะโรมาติก และสารฮิวมิก (aquatic humic substance ,AHS) เป็นต้น

โดยกระบวนการผลิตน้ำประป่าน้ำดิบจะต้องผ่านกระบวนการผลิตหลายขั้นตอนด้วยกันดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้ (การประปานครหลวง, 2550)

1) แหล่งน้ำ

แหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปานั้นได้มาจากแม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ หนอง บึง และน้ำนั้นจะต้องไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เกินกว่าที่กำหนดไว้ และปราศจากสิ่งโสโครกปะปน มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการตลอดปี ซึ่งเราจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำไว้ใกล้กับแหล่งน้ำในโรงสูบน้ำแรงดันต่ำ เพื่อสูบน้ำดิบไปผลิตเป็นน้ำประปา

2) การเติมสารเคมี

ก่อนที่น้ำดิบจากแหล่งน้ำจะไหลเข้าถังตกตะกอน จะมีการใส่สารเคมีลงไปเพื่อเร่งการตกตะกอน ได้แก่ สารส้ม และปูนขาว ในอัตราส่วนที่พอเหมาะพอดีกับคุณภาพน้ำดิบในแต่ละฤดูกาล

3) การตกตะกอน

เมื่อใส่สารเคมีแล้ว น้ำดิบจะไหลเข้ามาถังตกตะกอน โดยผ่านระบบการกวนเพื่อให้สารเคมีได้สัมผัสและทำปฏิกิริยากับตะกอน หรือความขุ่นที่อยู่ในน้ำจับเป็นก้อนเล็กๆ แล้วค่อยๆ มีขนาดใหญ่ขึ้นตกลงสู่ก้นถัง เหลือแต่น้ำใสไหลไปยังถังกรองน้ำ การตกตะกอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ความขุ่นของน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนไม่เกิน 7 หน่วย

4) การกรองน้ำ

เมื่อผ่านการตกตะกอนมาแล้ว น้ำจะไหลเข้ามาถังกรองน้ำ เพื่อกรองเอาตะกอนที่ละเอียดออกอีกครั้งหนึ่ง น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะใสมาก มีความขุ่นไม่เกิน 3 หน่วย ถังกรองจะต้องมีการล้างหน้าทรายกรองอยู่เสมอ

5) การฆ่าเชื้อโรค

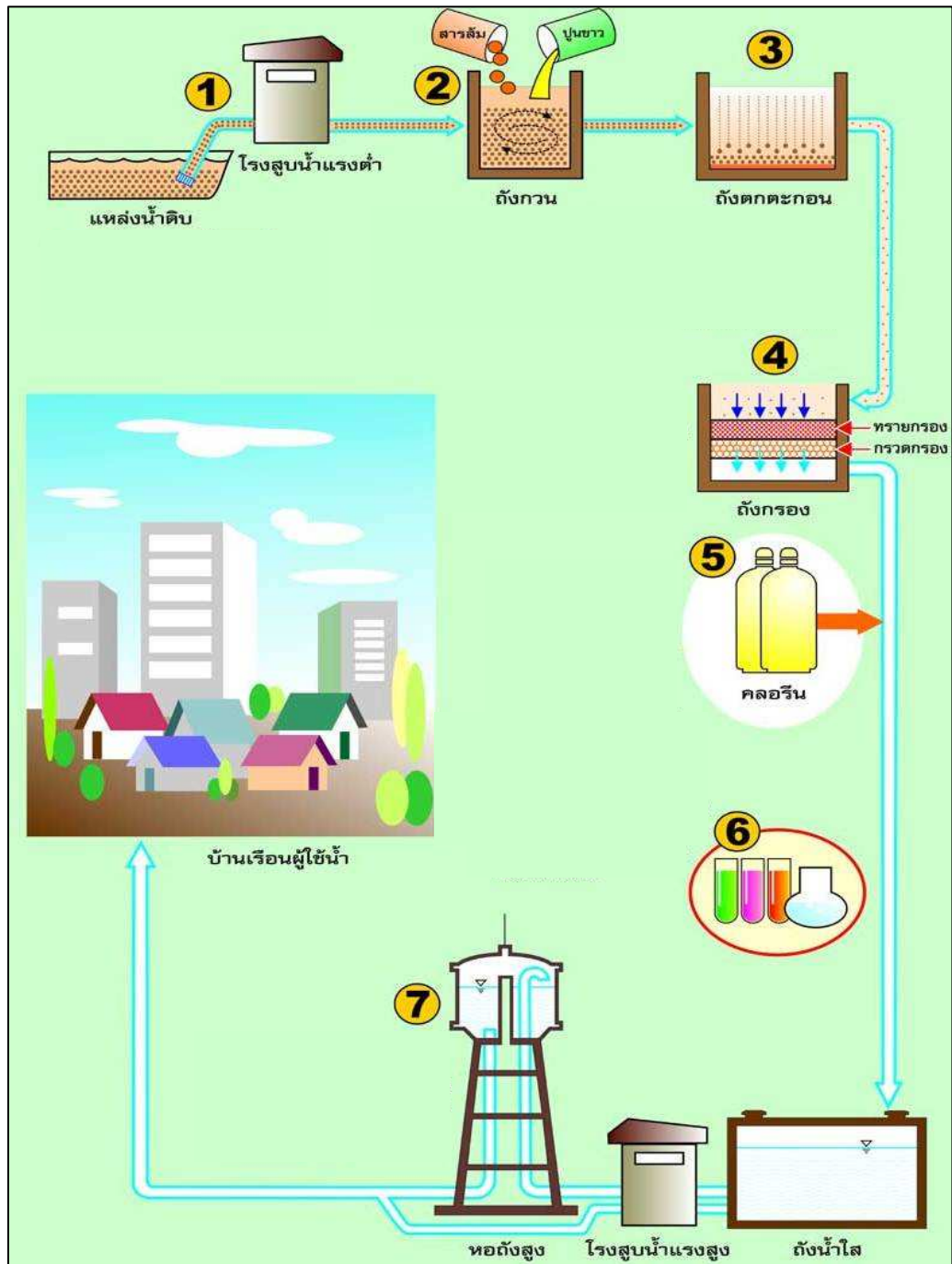
น้ำที่กรองแล้วเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการใส่สารคลอรีนฆ่าเชื้อโรค ซึ่งคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อโรคได้เกือบทุกชนิด ควบคุมง่าย และช่วยกำจัดกลิ่นสี โดยการใส่คลอรีนในน้ำให้ไหลไปตามเส้นท่อ เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนเข้ามาภายหลัง

6) ถังน้ำใส

เป็นถังสำหรับเก็บน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองแล้ว เรียกว่า น้ำประปา เพื่อรอจ่ายให้ผู้บริโภคได้ใช้น้ำสะอาด

7) หอถังสูง

เป็นหอถังสูงที่เก็บน้ำที่สูบขึ้นมาจากถังน้ำใส เพื่อทำให้เกิดแรงดันน้ำในการจ่ายให้บริการไปตามเส้นท่อถึงบ้านประชาชน



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (ที่มา: การประปานครหลวง, 2550)

3. ปัจจัยที่ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน

- 1) ปริมาณสารตั้งต้นของอินทรีย์สาร (organic substances) การเกิดสารไตรฮาโลมีเทนจะมีปริมาณมาก ถ้ามีปริมาณของอินทรีย์สารมาก
- 2) ปริมาณสารฮาโลเจน (Halogen-substituted concentration) การเกิดสารไตรฮาโลมีเทนจะมีปริมาณมาก ถ้ามีปริมาณของสารฮาโลเจนมาก
- 3) ระยะเวลาที่คลอรีนสัมผัสน้ำ (contact time) การเกิดสารไตรฮาโลมีเทนจะมีปริมาณมากขึ้น ถ้าระยะเวลาที่คลอรีนสัมผัสน้ำ มีระยะเวลานานขึ้น
- 4) อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิสูง สารไตรฮาโลมีเทนและคลอรีนจะระเหยได้มากขึ้น ทำให้มีสารไตรฮาโลมีเทนเหลืออยู่ในน้ำน้อยลง
- 5) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) pH ของน้ำที่เหมาะสมคืออยู่ในช่วง pH 5-7 เนื่องจากเป็นช่วงที่คลอรีนอยู่ในรูป ไฮโปคลอไรต์ สามารถเกิดปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนต่างๆ ได้ดี แต่ถ้า pH อยู่ในช่วงสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนต่างๆ จะน้อยลง ทำให้มีสารอินทรีย์มากขึ้น และถ้า pH ต่ำกว่า 4 จะมีคลอรีนอิสระอยู่ในน้ำมาก

4. กระบวนการที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทนในกระบวนการผลิตน้ำประปา

- 1) กระบวนการ pre-chlorination เป็นการเติมสารคลอรีนครั้งที่ 1 ในน้ำดิบที่สูบเข้ามาเพื่อฆ่าเชื้อโรค และสิ่งเจือปนในน้ำปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสม ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตในขั้นต่อ โดยจะเติมในน้ำดิบก่อนเข้าถังตกตะกอน
- 2) กระบวนการ post-chlorination เป็นการเติมสารคลอรีนครั้งที่ 2 หลังจากให้น้ำผ่านกระบวนการกรองแล้วเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนในน้ำ

การเติมคลอรีน หรือสารประกอบคลอรีนในน้ำประปา เป็นการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรค และเหตุผลที่ใช้คลอรีนเนื่องจาก คลอรีนมีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ดี นอกจากนี้การเติมคลอรีนยังมีประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. ออกซิไดซ์เหล็ก แมงกานีส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสีและกลิ่น
2. ทำลายสารอินทรีย์
3. ควบคุมปริมาณสาหร่าย

4. ช่วยให้การตกตะกอนดีขึ้น
5. ลดค่า BOD

โดยทั่วไปในน้ำประปาจะพบสารไตรฮาโลมีเทนหลักอยู่ 4 ชนิด ได้แก่ สารประกอบคลอโรฟอร์ม (chloroform) โบรโมไดคลอโรมีเทน (bromodichloromethane, BDCM) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (dibromochloromethane, DBCM) และโบรโมฟอร์ม (bromoform) โดยสารทั้ง 4 ชนิดนี้เกิดขึ้นควบคู่กัน และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของสารไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด

สารไตรฮาโลมีเทน	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
คลอโรฟอร์ม (chloroform)	CHCl_3	119.39	61-62
โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM)	CHBrCl_2	163.83	90.10
ไดโบรโมคลอโรมีเทน(DBCM)	CHBr_2Cl	208.29	120
โบรโมฟอร์ม (Bromoform)	CHBr_3	237.90	149-150

ที่มา : ดัดแปลงจาก การประปานครหลวง, 2550

2.1.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา

มาตรฐานปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา ที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาตามเกณฑ์ที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก

สารประกอบไตรฮาโลมีเทน	ปริมาณสารประกอบไตรฮาโลมีเทน (μl)
Chloroform	< 200
Bromodichloromethane	< 60
Dibromochloromethane	< 100
Bromoform	< 100
Trihalomethanes	< sum of ratio ; THM \leq 1

ที่มา : ดัดแปลงจาก การประปานครหลวง, 2550

sum of ratio คิดจาก

$$\frac{C.chloroform + C.BDCM + C.DBCM + C.bromoform}{G.V.chloroform \ G.V.BDCM \ G.V.DBCM \ G.V.bromoform} \leq 1$$

C = ปริมาณสารที่ตรวจพบในน้ำดื่ม

G.V. = ค่ากำหนดขององค์การอนามัยโลก

2.1.3 พิษวิทยาของสารไตรฮาโลมีเทน

1. การศึกษาพิษวิทยาในต่างประเทศ

รายงานการศึกษารายการเกิดมะเร็งจากสารไตรฮาโลมีเทน จากการประชุมของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับพิษวิทยาสุขภาพอนามัยของประชาชน และผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับคุณภาพน้ำ การประชุมนี้จัดขึ้นในวันที่ 1-2 พฤษภาคม 1997 ประเทศแคนาดา เมืองออตตาวา นำโดย Health Canada วัตถุประสงค์ของการจัดประชุมคือ เพื่อหาหลักฐานที่เชื่อถือได้เกี่ยวกับความเสี่ยงของการเกิดมะเร็ง และการเกิดความผิดปกติในตัวอย่างอื่น จากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเกิดคลอรีนในน้ำ

1) ศึกษาโดยวิธีพิษวิทยา (Toxicology)

จากผลการทดลองด้านพิษวิทยา ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า มะเร็งที่พบมากที่สุดคือมะเร็งตับ แต่ไม่เคยพบว่าผู้ป่วยเป็นมะเร็งตับจากการดื่มน้ำที่ผ่านการเติมคลอรีน ซึ่งก็สามารถบอกได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดมะเร็งตับนั้นเกิดผ่านกระบวนการที่เฉพาะ หรือต้องได้รับผลิตภัณฑ์นั้นในปริมาณที่สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้มาก

2) ศึกษาโดยวิธีระบาดวิทยา (Epidemiology)

จากผลการทดลองด้วยวิธีระบาดวิทยา ดังแสดงในตารางที่ 2.4 นี้ สามารถสรุปได้ว่าสารไตรฮาโลมีเทนมีผลทำให้เกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ ลำไส้ตรง และกระเพาะปัสสาวะได้

ตารางที่ 2.3 ศึกษาการเกิดมะเร็งจากไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นจากการเติมคลอรีน โดยทำการทดลองในสัตว์

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น/ปีที่ทำการทดลอง	สัตว์ที่ใช้ในการทดลอง	ผลการทดลอง
Chloroform		
National Cancer Institute (1976)	หนู(Mice)	มะเร็งตับ
National Cancer Institute (1975)	หนู (Rats)	มะเร็งไต
Jorgenson (1985)	หนู (Rats)	มะเร็งไต
Bromodichloromethane		
National Toxicology Program (1987)	หนู (Rats)	มะเร็งลำไส้ใหญ่และไต
National Toxicology Program (1987)	หนู(Mice)	มะเร็งตับและไต
Chlorodibromomethane		
National Toxicology Program (1984)	หนู(Mice)	มะเร็งตับ
Bromofrom		
National Toxicology Program (1989)	หนู (Rats)	มะเร็งลำไส้ใหญ่

ที่มา:ดัดแปลงจาก Health Canada,1997

ตารางที่ 2.4 ศึกษาการเกิดมะเร็งจากไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นจากการเติมคลอรีน

ผู้ที่ทำการศึกษา (ปีที่ทำการทดลอง)	ผลการศึกษา
Hildesheim (1998)	มีโอกาที่จะเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่
Marrett (1995)	มีโอกาที่จะเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่
Young (1987)	ไม่เกิดมะเร็ง
Cantor (1998)	มีโอกาที่จะเกิดมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ
King (1996)	มีโอกาที่จะเกิดมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ
Mcgeehin (1993)	มีโอกาที่จะเกิดมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Health Canada,1997

2. การศึกษาพิษวิทยาในประเทศไทย

จากฝ่ายวางแผนและควบคุมคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง ได้มีการรายงานความเป็นพิษจากสารไตรฮาโลมีเทนที่พบในน้ำประปา ดังนี้ (การประปานครหลวง, 2550)

1) คลอโรฟอร์ม (Chloroform, TCM)

พิษเฉียบพลันของสารโดยการรับเข้าทางปากของหนู (mice) เพศผู้และเพศเมีย มีค่า LD_{50} เท่ากับ 1,120 และ 1,400 mg/kg น้ำหนักหนูตามลำดับ คลอโรฟอร์มเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง คือ ทางปาก การหายใจและผิวหนัง ผลการศึกษาในระยะยาว (long-term) พบว่า ก่อให้เกิดมะเร็งในตับ (hepatocellular carcinoma) ในหนู (rat) รวมทั้งก่อให้เกิดเนื้องอกและเซลล์มะเร็งบริเวณหลอดเลือดฝอยไต (renal tubular adenoma, adenocarcinoma) ในหนูเพศผู้

2) โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane, BDCM)

พิษเฉียบพลันของสารโดยการรับเข้าทางปากของหนู (mice) เพศผู้และเพศเมีย มีค่า LD_{50} เท่ากับ 450 และ 900 mg/kg น้ำหนักหนูตามลำดับ เข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางระบบการย่อยอาหาร ผลการศึกษาในสัตว์ทดลองระยะยาวที่ความเข้มข้นสูง มีความเป็นพิษต่อตับและไต การวิเคราะห์ความเป็นพิษโดยใช้สิ่งมีชีวิต (bioassay) พบว่าโบรโมไดคลอโรมีเทน ก่อให้เกิดเนื้องอก และเซลล์มะเร็งที่ไต (renal adenoma, adenocarcinoma) ในหนู (rat) ทั้งเพศผู้และเพศเมีย รวมทั้งเกิดเนื้องอกและเซลล์มะเร็งในตับ (hepatocellular adenoma, adenocarcinoma) ในหนู (mice) เพศเมีย IRAC (International Agency for Research on Cancer) จัดอัตราเสี่ยงต่อการก่อมะเร็งของโบรโมไดคลอโรมีเทนอยู่ในกลุ่ม 2B หมายถึง สารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ คนที่ดื่มน้ำมีปริมาณโบรโมไดคลอโรมีเทนสูงกว่า 60 $\mu\text{g/l}$ ติดต่อกันเป็นเวลา 70 ปี จะมีอัตราเสี่ยงที่จะเกิดโรคมะเร็งได้ 1 คนใน 100,000 คน

3) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane, DBCM)

พิษเฉียบพลันทางปากต่อหนูเพศผู้และเพศเมีย (mice) มีค่า LD_{50} เท่ากับ 800 และ 1,200 mg/kg น้ำหนักหนูตามลำดับ ไดโบรโมคลอโรมีเทนเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางระบบการย่อยอาหาร การศึกษาในสัตว์ทดลองระยะยาว (long-term) ที่ความเข้มข้นสูง เป็นพิษต่อตับและไต การวิเคราะห์โดยสิ่งมีชีวิต (bioassay) พบว่าไดโบรโมคลอโรมีเทนก่อให้เกิดเนื้องอกที่ตับ (hepatic tumour) ในหนู (mice) แต่ไม่ก่อให้เกิดเนื้องอกในหนู (rat) IRAC (International

Agency for Research on Cancer) จัดได้โบรโมคลอโรมีเทนอยู่ในกลุ่ม 3 หมายถึงสารที่ไม่จัดอยู่ในสารก่อมะเร็ง (ฝ่ายวางแผนการผลิต การประปานครหลวง, 2550)

4) โบรโมฟอร์ม (Bromoform, TBM)

ความเป็นพิษเฉียบพลันทางปากต่อหนู (mice) เพศผู้ มีค่า LD₅₀ เท่ากับ 1,400 mg/kg น้ำหนักหนู และเพศเมียมีค่า LD₅₀ เท่ากับ 1,150 mg/l น้ำหนักหนู โบรโมฟอร์มเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางระบบการย่อยอาหาร ผลการศึกษาในสัตว์ทดลองระยะยาว (long-term) ที่ความเข้มข้นสูง มีความเป็นพิษต่อตับและไต การวิเคราะห์โดยสิ่งมีชีวิต (bioassay) พบว่าโบรโมฟอร์มมีความสัมพันธ์กับการเกิดเนื้องอกที่ลำไส้ใหญ่ในเพศผู้และเพศเมีย แต่ไม่มีผลต่อหนู (mice) IRAC (International Agency for Research on Cancer) จัดอัตราเสี่ยงต่อการก่อมะเร็งของโบรโมฟอร์มอยู่ในกลุ่ม 3

2.1.4 แนวทางการป้องกันและลดปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา

ในการลดปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำ มีวิธีการต่างๆ ดังนี้

1. การลดที่กระบวนการผลิตน้ำประปา
 - 1) ใช้แหล่งน้ำดิบที่มีคุณภาพดี
 - 2) ใช้จุนสี (copper sulfate) กำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำและกระบวนการผลิตน้ำ แทนการใช้คลอรีน โดยควบคุมไม่ให้มีปริมาณสูงเกินระดับซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ปกติทั่วไปใช้ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.16-1.2 mg/l
 - 3) ไม่มีการ pre-chlorination ในกระบวนการผลิตน้ำประปา
 - 4) ควบคุมการจ่ายคลอรีนในการ post-chlorination ให้มีปริมาณที่เหมาะสม (optimum dose) ไม่เกินความจำเป็น
 - 5) ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง หรือเกลือในการกำจัดสารไตรฮาโลมีเทน และสารพิษอื่นๆ ในช่วงเวลาที่น้ำดิบมีคุณภาพต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพแต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง
 - 6) ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้ากระบวนการผลิต เพื่อลดสารอินทรีย์ เช่น การเติมอากาศ การเติมผงถ่านกัมมันต์

7) เปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคมาเป็น การใช้ไอโซน คลอรามิน หรือคลอรีนไดออกไซด์

2. การลดที่รูปแบบการบริโภค

การลดปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนเพื่อการบริโภคมีหลายวิธี ดังนี้

- 1) การต้มเดือดและการผึ่งแดด เนื่องจากสารไตรฮาโลมีเทนเป็นสารที่ระเหยง่าย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารไตรฮาโลมีเทนจะระเหยไปอย่างง่าย
- 2) การตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากสารไตรฮาโลมีเทนสามารถระเหยได้แม้ในอุณหภูมิห้อง
- 3) การกรองด้วยเครื่องกรอง โดยคาร์บอนจะจับคลอรีนไว้ทำให้มีปริมาณคลอรีนลดลง
- 4) การแช่แข็ง ทำให้ปฏิกิริยาการรวมตัวกันระหว่างสารไตรฮาโลมีเทน และสารอินทรีย์เกิดขึ้นช้าลง

2.2 มีโซพอร์สซิลิเกต

มีโซพอร์สซิลิเกตเป็นวัสดุอนินทรีย์ที่เป็นของแข็งมีรูพรุน นิยมนำมาใช้เป็นสารดูดซับ และสามารถเร่งปฏิกิริยาให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นได้ ซึ่งวัสดุอนินทรีย์ที่มีรูพรุนสามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กคือเล็กกว่า 2 นาโนเมตร วัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางคือ 2-50 นาโนเมตร และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่คือใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร วัสดุที่มีรูพรุนชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานดูดซับคือ วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เช่น ซีโอไลต์ และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง เช่น MCM-41 และ HMS เป็นต้น ซึ่งข้อดีของวัสดุจำพวกนี้ที่เห็นได้ชัดคือ โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะยอมให้โมเลกุลผ่านช่องว่างเข้าไปยังพื้นผิวภายใน ซึ่งพื้นผิวภายในสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับสูง

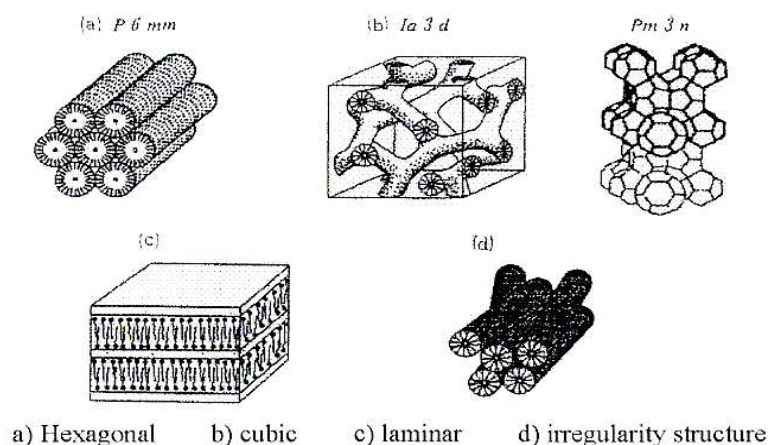
การสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตใช้ปรากฏการณ์รวมตัว โดยมีสารลดแรงตึงผิวเป็นเทมเพลต (template) และคะตะลิสต์ เพื่อสร้างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น เช่น การสังเคราะห์ซีโอไลต์คือ ZSM-5 ที่มีสมบัติในการคัดเลือกรูปร่างสูง ในปี 1970 ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้มีการควบคุมขนาดรูพรุนและรูปร่าง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเฉพาะของโมเลกุล อย่างไรก็ตาม ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก สารเคมีที่ใช้จะถูกจำกัดให้เป็นโมเลกุลเล็ก โดย

มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 12 อังสตรอม นอกจากนี้ หมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่บนพื้นผิวจะเป็นการ
สร้างภูมิภาคที่สามารถเกิดปฏิกิริยา แต่จะถูกจำกัดขนาดด้วยเช่นกัน ในปี 1990 ซิลิเกตและ
อะลูมินัมซิลิเกตที่มีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 15-300 อังสตรอม เริ่ม
ได้รับความสนใจ วัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง ถูกเปรียบเทียบกับซี
โอไลท์ พบว่ามีข้อดีกว่าคือการแพร่ที่รวดเร็วกว่าซีโอไลท์และสารที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีข้อ
ได้เปรียบคือ การมีองค์ประกอบของอะลูมินัมฟอสเฟตที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของ
โมเลกุลที่มีรูพรุนขนาดกลาง เนื่องจากไม่ต้องการทำให้เป็นวัสดุที่เป็นผลึกทำให้ข้อจำกัดทาง
ธรรมชาติของสารเคมีขององค์ประกอบอะตอมมีน้อยกว่าในซีโอไลท์มาก ข้อดีเหล่านี้ทำให้การ
นำไปประยุกต์ใช้ได้ผลดีมากขึ้น ทั้งในด้านเป็นสารเร่งปฏิกิริยา การแยกและการดูดซับโมเลกุล
ต่างๆ ซึ่งต่างจากการสังเคราะห์ซีโอไลท์ ซึ่งใช้โมเลกุลสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนประจุเพียงชนิดเดียว
หรือโลหะไอออนในโครงสร้าง ซึ่งโมเลกุลที่มีรูพรุนขนาดกลางสามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัย
การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวแล้วเรียงตัวเป็นเทมเพลต (template) สำหรับโครงสร้างสามมิติ
ของซิลิเกต เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้สารลดแรงตึงผิว และ
สามารถเปลี่ยนแปลงความยาวของโซ่กิ่งได้โดยเติมสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไตรเมทิลเบนซีน และ
ควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ในการสังเคราะห์ ซึ่งมีผลต่อการเรียงตัวของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว
และสปีชีส์ของซิลิเกตในเฟสของสารละลาย

2.2.1 ประเภทและโครงสร้างของมีโซพอร์ซิลิเกต

โครงสร้างของมีโซพอร์ซิลิเกตสามารถแยกประเภทได้ตามลักษณะโครงสร้างผลึก
รูปร่างและขนาดของรูพรุน องค์ประกอบของโครงสร้างและการก่อตัว ภาพที่ 2.2 แสดงประเภทและ
ลักษณะของมีโซพอร์ซิลิเกตชนิดต่างๆ โครงสร้างผลึกแบ่งได้เป็น ทรง 6 เหลี่ยม ทรงลูกบาศก์
เป็นแผ่น และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีและสภาวะในการสังเคราะห์

Crystalline Structures	Hexagonal Cubic Laminar Irregularity Structure
Poresize	1.5~10 nm, 3~7 nm, 5~30 nm 0.4~1.5 nm
Composition of structures	SiO ₂ , SiO ₂ -MO _{n/2} (M = Al, Ti, V, B, Mn, Fe, Ga, Zr) Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂ , Ta ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅ , SnO ₂ , HfO ₂ , AlPO ₄
fromation	Powder, Partical, sphere, etc.



ภาพที่ 2.2 ประเภทและลักษณะของมีโซพอร์ชนิดต่างๆ

(Patiparn และ Takizawa, 2004 อ้างถึงใน Takeucho, 1999)

2.2.2 การสังเคราะห์วัสดุซิลิเกตที่มีรูพรุน

การสังเคราะห์วัสดุอนินทรีย์ที่มีรูพรุน จะใช้สารลดแรงตึงผิวอินทรีย์เป็นของเหลวที่เป็นโครงสร้างผลึกทำให้เกิดปฏิกิริยา (liquid crystal templating mechanism, LCT) และซิลิเกตในเฟสสารละลาย (สารประกอบเชิงซ้อนซิลิเกตอินทรีย์) สารอัลคิลไตรเมทิลแอมโมเนียมเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เป็นโครงสร้างในการก่อตัวของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางและไซเดียมซิลิเกตเป็นแหล่งซิลิเกตที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กไซอัลคิลของสารลดแรงตึงผิวที่มีความยาวสั้น ($n=6$) (เช่น เตตระเมทิลแอมโมเนียม, เตตระเอทิลแอมโมเนียม เป็นต้น) ถูกใช้ใน LCT จากโมเลกุลของสารอินทรีย์ในสภาวะที่มี

อุณหภูมิสูง ความสามารถในการละลายของไซอัลคิลที่สั้นเหล่านี้จะมีค่าค่อนข้างสูง (มากกว่า 50% ในน้ำ สามารถละลายได้ง่าย) ส่วนในทางตรงกันข้าม การผลิตตัวเร่งที่มีรูพรุนขนาดกลาง สารลดแรงตึงผิวที่มีไซอัลคิลใหญ่กว่าได้ถูกใช้ใน LCT สำหรับ supramolecular templating ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำ ปัจจุบันก็เริ่มมีการสังเคราะห์ และศึกษาคุณลักษณะของมีโซพอร์สซิลิเกต ชนิดต่างๆ เพิ่มขึ้นอีก เช่น MCM-41, HMS และ FSM-16 ซึ่งการสังเคราะห์ได้มีการพัฒนาขึ้นโดยสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ในหลายงานวิจัยมีการปรับปรุงมีโซพอร์สอย่างง่ายโดยการใส่ธาตุโลหะแทนเข้าไปในโครงสร้าง เช่น อะลูมิเนียม, โบรอน, ไทเทเนียม, วานาเดียม และแกลเลียม ซึ่งมีสมบัติในการเป็นคะตะลิสต์ (Yue และคณะ, 1998; Anh และคณะ, 1998; Tuel, 1999)

ที่ความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ (Critical micelle concentration, cmc) การรวมกันของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดขึ้นเป็นรูปร่าง และเมื่อมีการรวมตัวกันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ cmc รูปร่างจะเป็นแบบทรงกระบอกและทรงกลม แต่ที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้น การรวมตัวกันจะเกิดความซับซ้อนขึ้นจนกลายเป็นทรงหกเหลี่ยม เป็นแผ่น หรือเป็นทรงลูกบาศก์ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดลักษณะเฉพาะของโครงสร้างรูพรุน วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะถูกสังเคราะห์ขึ้นที่ความเข้มข้นต่ำกว่าสารเคมีที่ใช้เป็นโครงสร้างซิลิเกต ส่วนคุณลักษณะของมีโซพอร์สซิลิเกตนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น โครงสร้างผลึก จะขึ้นกับอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารลดแรงตึงผิวต่อซิลิเกต ซึ่งอัตราส่วนเป็นดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวต่อซิลิเกต

โครงสร้างผลึก	อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวต่อซิลิเกต
หกเหลี่ยม	น้อยกว่า 1
แผ่น	1.2 ถึง 2
ลูกบาศก์	1 ถึง 1.5

นอกจากนี้ การควบคุมขนาดของรูพรุน โดยควบคุมความยาวของหมู่ไซอัลคิลของสารลดแรงตึงผิวซึ่งจะส่งผลต่อขนาดของรูพรุนของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง ในทางตรงกันข้าม

ความหนาของผนังของวัสดุที่สังเคราะห์ได้จะยังคงที่แม้มีการแปลงค่าความยาวของหมู่ซิลิกอนของสารลดแรงตึงผิว

2.2.3 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกต (HMS)

Tanev และ Pinnavaia (1995) เป็นผู้คิดค้นวิธีการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกตเป็นอันดับแรก โดย neutral synthesis pathway (S^0I^0) ใช้สารอินทรีย์ที่เป็นตัวกลางเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทที่ไม่มีประจุ กรณีนี้สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น เอมีนปฐมภูมิ พันธะไฮโดรเจนค่อนข้างจะมีผลในการสร้างมีไซเฟสแก่สารอินทรีย์และอินทรีย์มากกว่าอันตรกิริยาจากไฟฟ้าสถิต ในภาวะ S^0I^0 นี้ จะสร้างโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางที่มีความหนาของผนังมากและมีการกระจายของขนาดน้อย และองค์ประกอบภายนอกบริเวณของรูพรุนขนาดกลางนี้จะสัมพันธ์กับวัสดุที่ถูกสังเคราะห์ใน pathway อื่น เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกตถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ S^0I^0 pathway ในน้ำ ต่อส่วนผสมของตัวทำละลายเอทานอลในตัวกลางปฏิกิริยา ซึ่งเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) เป็นสารเคมีที่ใช้เป็นแหล่งของซิลิกาและสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุจะใช้โดเดซิลลามีน (DDA) และมีสารเอมีนปฐมภูมิหลายชนิดที่มีการนำมาศึกษาเพื่อสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกต แต่โดเดซิลลามีนเป็นสารที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด (Tanev และ Pinnavaia, 1995) เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกตนั้นมีวิธีการสังเคราะห์หลายวิธี แต่อย่างไรก็ตาม หลังจากที่มีการเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้สังเคราะห์โดยการศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานแล้วพบว่า กระบวนการสังเคราะห์ของ Tanev และคณะ (1994) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายทั้งยังได้สารที่มีเสถียรภาพสูง และนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง โดยมีอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกตดังนี้คือ เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต(TEOS) 1 โมล : โดเดซิลลามีน (DDA) 0.27 โมล : เอทานอล 9.09 โมล : น้ำ 29.6 โมล ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของเฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้พบว่า อยู่ในช่วง 2.4 – 4.2 นาโนเมตรและ 750 – 1,120 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (Tanev และคณะ, 1994; Mercier และ Pinnavaia, 1997; Gontier และ Tuel, 1999)

ซึ่งวิธีการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกตแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต

ชนิด	HMS, AI-HMS	HMS
องค์ประกอบ สารละลาย A	1.เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) 2.เอทานอลบริสุทธิ์98% 1TEOS : 6.54 เอทานอล	1.เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต(TEOS) 2.เอทานอล 3.ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 1TEOS : nROH (R = เอทานอล/ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ molar ratio = 8.5, n = ค่าที่ทำการศึกษา)
สารอินทรีย์ (Organic template) สารละลาย B	1.โดเดซิลลามีน(DDA) 2.กรดไฮโดรคลอริก(HCl) 3.น้ำดีไอออกไซด์ 0.27 DDA : 0.02 HCl : 32.3 น้ำ	1.โดเดซิลลามีน(DDA) 2.เอทานอล 3.น้ำดีไอออกไซด์ $C_{12}H_{25}NH_2$: 0.02 เอทานอล: 88น้ำ
โลหะที่เติม สารละลาย C	อะลูมิเนียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 98% 5.3 กรัม	-
วิธีการ	- เติมสารA 72 กรัมลงในสารB 157 กรัม - กวน 18 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง - เติมอะลูมิเนียมซัลเฟต กวน 5 นาที - กรองและล้างด้วยน้ำ Milli Q - อบแห้งที่ 100 °C 24 ชั่วโมง - เผาที่อุณหภูมิ 650 °C 4 ชั่วโมง	- องค์ประกอบในการสังเคราะห์ เป็นดังนี้ 0.25 DDA : nROH : TEOS:11-36น้ำ - ละลาย TEOS ในเอทานอลที่อุณหภูมิ 80°C(สารA) - เติมสารA ลงในสารB กวน 1 ชั่วโมงที่ 25°C ทิ้งไว้ 20 ชั่วโมง - กรองและล้างจนเป็นกลางอบแห้งที่80°C - เผาที่650 °C 3 ชั่วโมง
วิธีของ	Cooper และคณะ, 1999	Renzo และคณะ, 1999

ตารางที่ 2.6(ต่อ) การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต

ชนิด	HMS, Ti-HMS	HMS, AI-HMS
องค์ประกอบ สารละลาย A	1.เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) 15 กรัม 2.เอทานอลบริสุทธิ์ 21 กรัม 3.ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 4.2 กรัม ผสมกันโดยการกวน	1.เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) 1 โมล 2.เอทานอล 6.5 โมล 3.ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 1 โมล
สารอินทรีย์ (Organic template) สารละลาย B	1.โตเดซิลลามีน(DDA) 3.5 กรัม 2. ไฮโดรคลอริก(HCl) 0.1 นอร์มอล 1.4 มิลลิลิตร 3.น้ำ 46 กรัม	1.เฮกซะเดซิลลามีน 0.3 โมล 2.น้ำ 36 โมล
โลหะที่เติม สารละลาย C	ไทเทเนียมเอทอกไซด์	อะลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์
วิธีการ	- เติมไทเทเนียมเอทอกไซด์ลงในสาร กวน 30 นาที - เติมสารB กวนที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน - กรองและล้าง - อบแห้งและเผาที่ 650 °C 10 ชั่วโมง	- เติม TEOS และ อะลูมิเนียมไอโซ โพรพอกไซด์ลงในส่วนผสมของ เอทานอลและไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ - ให้ความร้อนที่ 70°C 4 ชั่วโมง - เติมส่วนผสมที่ได้ลงในสาร B - ปั่นกวน 1 ชั่วโมง และทิ้งให้เกิด ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง - ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง - เผาที่ 650 °C 3 ชั่วโมง
วิธีของ	Kruk และคณะ, 1999	Yue และคณะ, 1998

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต

ชนิด	HMS, Modified-HMS
องค์ประกอบ สารละลาย A	1.เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS)
สารอินทรีย์ (Organic template) สารละลาย B	1. เฮกซะเดซิลลามีน (HAD) 2. เอทานอล 3.น้ำ
โลหะที่เติม สารละลาย C	โลหะ อะลูมิเนียม, แกลเลียม, เหล็ก และโบรอนโดยวิธีของ Tanev และ Pinnavaia (1995)
วิธีการ	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราส่วนของสารเคมี $\text{SiO}_2:\text{xMeO}_2:0.3\text{HDA}:7\text{เอทานอล}:35\text{น้ำ}$ เมื่อ $0 < x < 1$ - เติม HAD ในสารละลายที่มีน้ำและเอทานอลอยู่ กววนจนเป็นเนื้อเดียวกัน - เติม TEOS ขณะปั่นกววนและกววนต่ออีก 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง - แยกของแข็งโดยการปั่นเหวี่ยง ล้างด้วยน้ำกลั่น และทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง - เเผาที่ 550 °C 10 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่มีการเป่าอากาศ การกำจัดโมเลกุลสารอินทรีย์โดยการเผาจะทำลายโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง ดังนั้นการสกัดด้วยตัวทำละลายจะเป็นการแก้ปัญหาหนึ่ง - เติม HMS 1 กรัมลงในเอทานอล 20 มิลลิลิตรที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์เล็กน้อย - กววนส่วนผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วกรองและล้างด้วยเอทานอลเย็น - สกัดซ้ำอีก 1 ครั้ง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C ในตู้อบ - บางกรณี การสกัดอาจทำหลังจากการเผาที่ 550 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
วิธีของ	Kruk และคณะ, 1999

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต

2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้ X-Ray Powder Diffraction (XRD)

X-ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive method) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้ดังนี้ คือ

1. ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสาร (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative)
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

สำหรับเทคนิค X-ray Spectroscopy (XRS) หรือ X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFS) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นแบบที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆ ที่ละธาตุ (sequencial) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่มีความทันสมัยสูง ช่วยให้เทคนิคนี้นิยมทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย เพราะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงถึงความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ trace analysis (ppb) ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRFS นี้มีอยู่ 2 ระบบ ด้วยกัน คือ

- ก. ระบบที่วัดเป็นความยาวคลื่น (wavelength dispersion system)
- ข. ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (KeV) (energy dispersion system)

วิธี X-ray diffraction เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับทดสอบวัตถุที่เป็นผลึกหรือไอส่วนของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับการกระเจิงของโครงร่างผลึก การกระเจิงของรังสีจะสามารถสังเกตได้โดยตรงโดยลำแสงที่สะท้อนจากผลึกในแนวราบ

หลักการและวิธีวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึก คือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึก จะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกันซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่า d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึก

ในปี ค.ศ.1912 W.H.Bragg และ W.L.Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอกซ์บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ ถูกเสนอด้สมการ

$$d \sin \theta = n\lambda$$

ซึ่งสมการดังกล่าวนี้เรียกว่า “ Bragg’s law ”

ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ ซึ่งอยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากเส้นลวดซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเข้มสูงเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปมักจะทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้วงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L และ M shell) เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอกซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่างและรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่าง จะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์ (detector)

2.3.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน

วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจน โดยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04H

วิธีการใช้คือ ใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาชนะทั้งสองภายใต้

ความดันปกติ ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมานอมิเตอร์ โดยมีวิธีการดังนี้

1. อบตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นจัดในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 0.02-0.05 กรัม ใส่ลงใน Adsorption vessel
2. วางเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างไว้ลงใน Heating Thermostat
3. ชั่งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนธรรมดาที่ควบคุมความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด
4. ใช้เซลล์ 2 เซลล์ ที่มีปริมาตรเท่ากันโดยเซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์เปล่า
5. ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในเซลล์ทั้งสอง ภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง
6. ทำให้เซลล์ทั้งสองเย็นจัดใน Cold Bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะให้เกิด Pressure Difference ระหว่างเซลล์ทั้งสองซึ่งวัดได้โดยใช้ Differential Monometer
7. อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวต่อไป
พื้นที่ผิวจำเพาะคำนวณโดยใช้ข้อมูลการดูดซับในช่วงความดันสัมพัทธ์ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.14 และใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) คือ

$$\frac{1}{v[(P_0/P) - 1]} = \frac{c-1}{v_m c} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \frac{1}{v_m c}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวรูพรุน (cm^3)

V_m = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวรูพรุนแบบโมเลกุลชั้นเดียว (Mono-molecule Layer) ปกคลุมทั่วผิวแบบรูพรุน (cm^3)

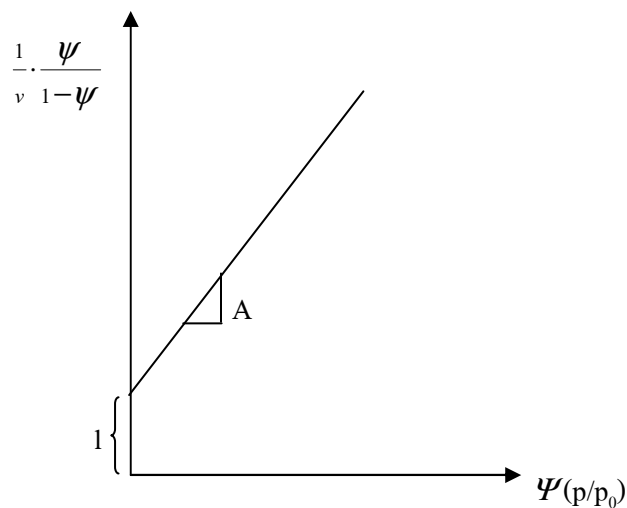
P	=	ความดันที่สภาวะใดๆ (mmHg)
P ₀	=	ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว (Vapor Pressure or Saturated Vapor) (mmHg)
c	=	ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด (c) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$c = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right)$$

เมื่อ E₁ เป็นความร้อนของการดูดซับในชั้นที่หนึ่ง และ E_L เป็นความร้อนการดูดซับในชั้นที่สองหรือมากกว่า

จากสมการของ BET สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงได้ โดยแกน Y คือ ค่า $1/v[(P_0/P) - 1]$ และแกน X คือ ค่า $\phi = P/P_0$ ที่ได้จากการทดลอง เรียกกราฟที่ได้ว่า BET Plot ดังภาพที่ 2.2 จากความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้ค่าที่อยู่ในช่วง $0.05 < P/P_0 < 0.35$



กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนและความดันสัมพัทธ์ จากสมการของ BET (Suwat, 2006)

เมื่อ V_m และ c เป็นค่าที่ได้จากสมการของ BET จากภาพที่ 2.3 ค่าที่ได้จากความชัน (A) และจุดตัดแกน Y (l) สามารถนำไปคำนวณปริมาณในการดูดซับก๊าซในชั้นที่หนึ่งได้จากสมการ

$$v_m = \frac{1}{A + l}$$

$$C = 1 + \frac{A}{l}$$

V_m มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยตารางเมตรต่อกรัม ได้จากสมการ

$$S = \frac{N_0 V_m A}{22414m}$$

เมื่อ	S	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
	N_0	=	เลขอวอกาโดร
	M	=	ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊ส
			($N_2 = 16.2 \text{ \AA}^2$)

ขนาดของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุน สามารถคำนวณหาได้โดยวิธีของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) และสมการ Kelvin ซึ่งสมการ Kelvin นั้น จะใช้หาขนาดในช่วง 2 – 6.5 นาโนเมตร เมื่อมีการใช้สมการ Kelvin ในการศึกษาการดูดซับและคายซับไนโตรเจน โดยจะตั้งสมมติฐานให้รูปร่างของรูพรุนเป็นทรงกระบอก ที่ถูกเติมเต็มด้วยไนโตรเจนเหลว ซึ่งสมการเป็นดังนี้

$$\ln \frac{p_0}{p} = \frac{2\mathcal{W}_L}{rRT}$$

เมื่อ	p_0	=	ความดันไออิ่มตัว
-------	-------	---	------------------

$$\begin{aligned}
 p &= \text{ความดันที่สภาวะที่สมดุล} \\
 V_L &= \text{ปริมาตรของของเหลว} \\
 \gamma &= \text{ความเครียดของพื้นผิว}
 \end{aligned}$$

ถ้ารัศมีของรูพรุนน้อยกว่าค่า r จะถูกเติมด้วยความดันไอควบแน่น โดยปกติแล้ว การดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดการควบแน่นแบบแคปิลลารีในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการ Kelvin จะไม่ให้ค่ารัศมีของรูพรุนที่ถูกต้อง เพราะขนาดของรูพรุนจะลดลงเนื่องจากความหนาของชั้นของสารดูดซับ ดังนั้น จึงต้องมีการคิดค่าการควบแน่นแคปิลลารีที่ความดันใดๆ จากสมการ

$$r_p = \frac{2\mathcal{W}_L}{RT \ln p_0 / p} + t$$

$$\text{เมื่อ } t = \text{ความหนาของชั้นสารดูดซับ}$$

ความหนาสามารถประมาณได้อย่างแม่นยำโดยสมการของ harkins-Jura ในช่วงความสัมพัทธ์เท่ากับ 0.1 – 0.95

$$t \left(\frac{p}{p_0} \right) = 0.1 \left[\frac{60.65}{0.03071 - \log(p/p_0)} \right]^{-0.3968}$$

2.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยใช้ฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry)

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโคป ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาใช้วิเคราะห์อย่างแพร่หลาย เพื่อศึกษาสมบัติของพื้นผิวของสารดูดซับที่จะส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับ

สำหรับมีไซพอร์สซิลิเกต ในการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปจะใช้ช่วงสเปกตรัม 400 - 4000 cm^{-1} ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่พบในการวิเคราะห์มีไซพอร์สซิลิเกตแสดงดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ใช้ในการต่อติด เพื่อปรับปรุงมีไซพอร์สซิลิเกตอีกด้วย

ตารางที่ 2.7 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในมีโซพอร์สซิลิเกต

หมู่ฟังก์ชันที่พบ	ช่วงสเปกตรา (cm-1)	เอกสารอ้างอิง
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 SiO ₄	800	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Si-OH	973	Roy และคณะ, 1996
H-O-H	3457	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978
Deformation mode of H ₂ O	1650-1600	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978
O-H	3750	Parfitt และคณะ, 1985
CH ₃ of ethoxy group	2970	Brunel และคณะ, 1995
-CH ₂ - stretching vibration	2940	Brunel และคณะ, 1995
Si-O-Ti	960	Ahn และคณะ, 1999; Blasco และคณะ, 1995
C-H of alkyl and phenyl groups	1500-1300	Wang และคณะ, 1999

2.3.4 การวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิว

หลักการของการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า จะต้องใช้ค่าจากจุดทุกจุดที่ได้จากกราฟของการไทเทรต โดยผลรวมของประจุลบเท่ากับผลรวมของประจุบวก (Schultheness และ Spark, 1986) ดังสมการ

$$\text{ผลรวมของประจุบวก} = \text{ผลรวมของประจุลบ}$$

สำหรับตัวอย่างในการไทเทรตพื้นผิวออกไซด์แอมโฟเทอริก ด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ในรูปของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ไฮเดียมคลอไรด์ ได้ผลดังนี้

$$[\text{OH}^-] + [\text{Cl}^-] + [\text{negative surface}] = [\text{H}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{positive surface}]$$

หรือ

$$q_0 = [\text{positive surface}] - [\text{negative surface}]$$

$$= [C_A - C_B] - [H^+ - OH^-]$$

เมื่อ

$$q_0 = \text{ประจุบนพื้นผิว}$$

$$[\text{positive surface}] = \text{ความเข้มข้นของประจุบวกบนพื้นผิว}$$

$$[\text{negative surface}] = \text{ความเข้มข้นของประจุลบบนพื้นผิว}$$

$$[H^+] = 10^{-\text{pH}}$$

$$[OH^-] = 10^{\text{pH}-\text{pK}_w}$$

$$[Cl^-] = [\text{NaCl}]_{\text{add}} + [\text{HCl}]_{\text{add}}$$

$$[Na^+] = [\text{NaCl}]_{\text{add}} + [\text{NaOH}]_{\text{add}}$$

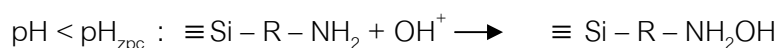
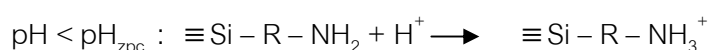
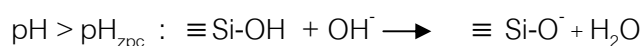
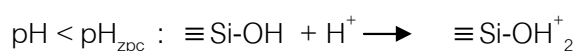
$$[C_A - C_B] = [Cl^-] - [Na^+]$$

$$= [\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}}$$

เมื่อประจุบนพื้นผิวเป็นกลาง ประจุลบและประจุบวกบนพื้นผิวจะมีค่าเท่ากัน หมายความว่า บนพื้นผิวมีประจุเป็นศูนย์ ที่พีเอชที่มีประจุเป็นศูนย์นี้ (pH_{zpc}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$[C_A - C_B] = [H^+ - OH^-]$$

หมู่ไฮดรอกซิลจะแสดงบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นซิลิเกต ซึ่งโปรตอนสามารถเพิ่มหรือลดไปได้ ผลของประจุบนพื้นผิวจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ที่พีเอชต่ำ พื้นผิวจะมีการเพิ่มโปรตอน และจะกลายเป็นประจุบวก และที่พีเอชสูงโปรตอนจะหายไป ทำให้พื้นผิวเป็นประจุลบ



ค่า pH_{zpc} ของวัสดุที่เป็นซิลิเกต จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น Cabot L90, diatomite และ FSM-16 มีค่า pH_{zpc} เท่ากับ 2 - 3.7, 4 - 7 และ ประมาณ 6 ตามลำดับ (Mohamed และคณะ, 2002; Ghouti และคณะ, 2003)

2.4 สมบัติทางกายภาพและเคมีของมีโซพอร์ซิลิเกตชนิดต่างๆ

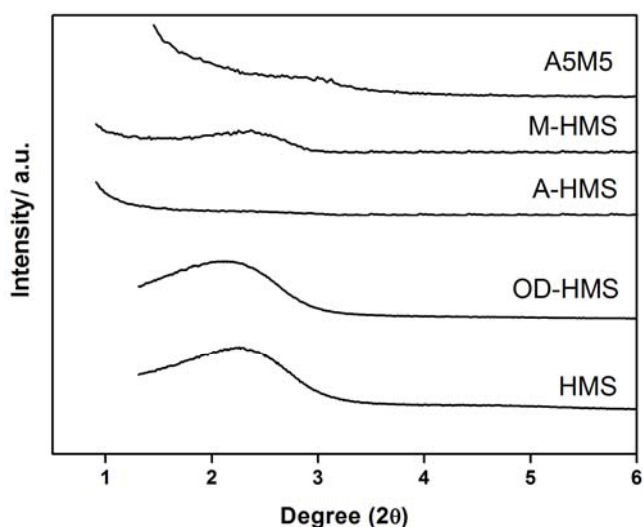
งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับชนิดมีโซพอร์ซิลิเกตและดัดแปรพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ หมู่อะมิโน หมู่อัลคิลและหมู่เมอร์แคปโต ด้วยเทคนิคการคอนเดนเซชันร่วม (Co-condensation) ได้แก่ตัวกลาง A-HMS และ M-HMS และการต่อติดภายหลังกระบวนการสังเคราะห์ (Post-synthesis grafting) ได้แก่ตัวกลาง OD-HMS รวมถึงการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแบบสองหมู่ ได้แก่หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโตบนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิลิเกตด้วยเทคนิคการคอนเดนเซชันร่วม จากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physico-chemical property) ด้วยเทคนิควิเคราะห์ต่างๆ เช่น X-ray diffraction (XRD) ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน FTIR การไตเตรทกรดเบส และการวัดค่าความชอบน้ำ เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด (เช่น โครงสร้างรูพรุน พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ประจุบนพื้นผิว และความชอบน้ำของตัวกลางดูดซับ เป็นต้น) ร่วมกับผลประสิทธิภาพการดูดซับ เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ของดูดซับมลสารต่อไป

ตารางที่ 2.8 ชนิดของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตัวกลางดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน
HMS	ซิลานอล (SiOH)
A-HMS	อะมิโน (-NH ₂) และซิลานอล (SiOH)
OD-HMS	ออกทิล (-C ₈ H ₁₇) และซิลานอล (SiOH)
M-HMS	เมอร์แคปโต (-SH) และซิลานอล (SiOH)
A5M5-HMS	อะมิโน (-NH ₂) เมอร์แคปโต (-SH) และซิลานอล (SiOH)
PAC	คาร์บอนิล (C=O) ฟีนิล (-C ₆ H ₅) และอื่นๆ

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกต

การศึกษาโครงสร้างรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกตตั้งต้น และมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีฟังก์ชันอินทรีย์ โดยเครื่อง X-ray diffractometer ในช่วง 0.5° - 6.0° แสดงดังภาพที่ 2.3 พบว่าโครงสร้างรูพรุนของ HMS มีสเปกตรัมเด่นชัดในช่วง $2\theta = 2.2^{\circ} - 2.3^{\circ}$ ซึ่งสเปกตรัมในช่วงดังกล่าวสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมของมีโซพอร์สซิลิเกต (hexagonal) นอกจากนี้พบว่ามีโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ได้แก่ A-HMS และ M-HMS สูญเสียความเป็นระเบียบ (order) และความสมบูรณ์ของโครงสร้างรูพรุน ซึ่งสังเกตได้จากการหายไปของสเปกตรัม XRD ของ A-HMS และความสูงที่ลดลงของสเปกตรัมของ M-HMS เมื่อเทียบกับมีโซพอร์สซิลิเกตตั้งต้น (HMS) การสูญเสียความเป็นระเบียบและความสมบูรณ์ของโครงสร้างอาจเกิดจากการเกิดการเชื่อมโยงข้าม (Cross linked) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอินทรีย์กับซิลิกา ซึ่งขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยมของมีโซพอร์สซิลิเกตอันเนื่องมาจากการต่อติดหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีคอนเดนเซชันร่วม (co-condensation) สำหรับตัวดูดซับแบบผสมระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต (A5M5) พบว่า สูญเสียความสมบูรณ์ของโครงสร้างน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการต่อติดด้วยหมู่อะมิโนเพียงชนิดเดียว ในขณะที่โครงสร้างของมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ชนิด OD-HMS มีความสมบูรณ์ใกล้เคียงกับ HMS ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ด้วยวิธีการต่อติดภายหลังกระบวนการสังเคราะห์ (Post-synthesis grafting) ส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้าง hexagonal น้อยกว่าวิธีคอนเดนเซชันร่วม (co-condensation) และความสมบูรณ์ของโครงสร้างยังขึ้นกับชนิดของไฮดรอกซิลอินทรีย์ที่ทำการต่อติดบนพื้นผิวอีกด้วย ซึ่งงานวิจัยที่ได้มีการศึกษามาก่อนยังให้ข้อมูลว่า สภาวะในการสังเคราะห์และปริมาณไฮดรอกซิลอินทรีย์ (organosilane) ที่ใช้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างรูพรุนและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ อีกด้วย (Tanev and Pinnavaia, 1996)



ภาพที่ 2.3 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ HMS, OD-HMS, A-HMS, M-HMS และ A5M5-HMS (Parat, 2011 ; ชูติมา, 2551)

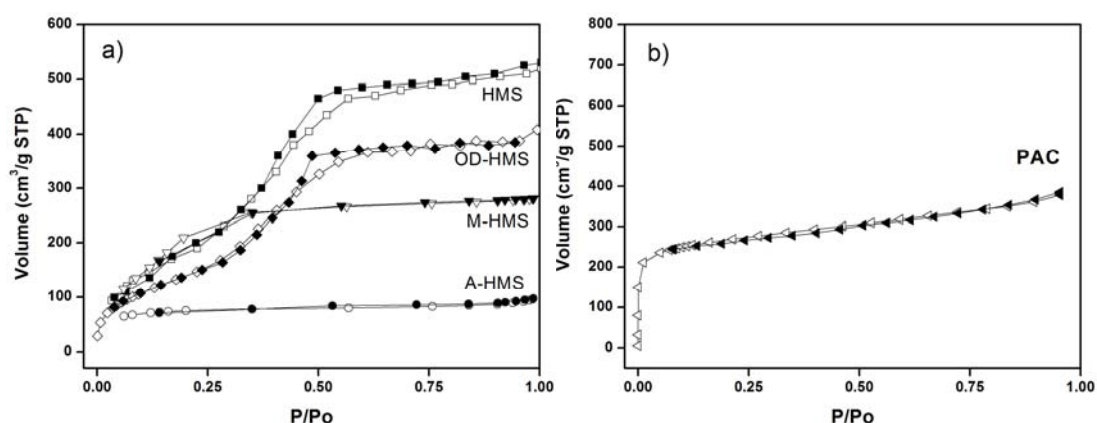
2.4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุน

การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวกลางดูดซับใช้เทคนิคการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption) ซึ่งไอโซเทอรัมของการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนแสดงดังภาพที่ 2.4 (a) และ (b) จากภาพที่ 2.4 (a) HMS, A-HMS, M-HMS และ OD-HMS แสดงไอโซเทอรัมของก๊าซไนโตรเจนประเภทที่ 4 (Type IV) จัดประเภทโดย IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งชี้บ่งว่าตัวกลางดูดซับดังกล่าวมีรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) ขณะที่ไอโซเทอรัมของ PAC จัดเป็นประเภทที่ 1 (Type I) คือมีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore)

จากไอโซเทอรัมดังกล่าวสามารถวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน แสดงดังตารางที่ 2.9 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ HMS, A-HMS, M-HMS, OD-HMS, A5M5-HMS และ PAC เท่ากับ 712, 262, 912, 477, 426 และ 980 m^2/g ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับชนิดมีโซพอร์สซิลิกาเกิดพบว่า A-HMS มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด ประกอบกับขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 3.95 นาโนเมตร ชี้บ่งถึงความพังทลายของโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัม XRD ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.4.1 นอกจากนี้พบว่า การต่อติดหมู่ฟังก์ชันผสมระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต (A5M5-HMS) มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น ประกอบกับขนาดของรูพรุนเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับ A-HMS นอกจากนี้ M-HMS มีพื้นที่ผิว

เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมลสารเพิ่มขึ้นได้ จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชนิดของไซเลนอินทรีย์ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะ

สำหรับ PAC พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุน เท่ากับ $980 \text{ m}^2/\text{g}$ และ 1.90 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งขนาดของรูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากที่สุดของ PAC



ภาพที่ 2.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ (a) HMS, Ti-HMS, OD-HMS, A-HMS และ M-HMS (b) PAC (Parat., 2011)

ตารางที่ 2.9 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวกลางดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน	Pore diameter (nm)	V_p ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
HMS	ซิลานอล	2.60^a	773^a	712^a
A-HMS	อะมิโน และซิลานอล	3.95^a	147^a	262^a
M-HMS	เมอร์แคปโต และซิลานอล	2.48^a	433^a	912^a
OD-HMS	ออกทิล และซิลานอล	2.36^b	500^b	477^b
A5M5-HMS	อะมิโน เมอร์แคปโต และซิลานอล	2.60^c	220.42^c	426^c
PAC	คาร์บอนิล ฟีนิล และอื่นๆ	1.90^a	276^a	980^a

^a อ้างอิง (Punyapalukul et al., 2009)

^b อ้างอิง (Punyapalukul and Takizawa, 2006)

^c อ้างอิง (ชุตินา, 2551)

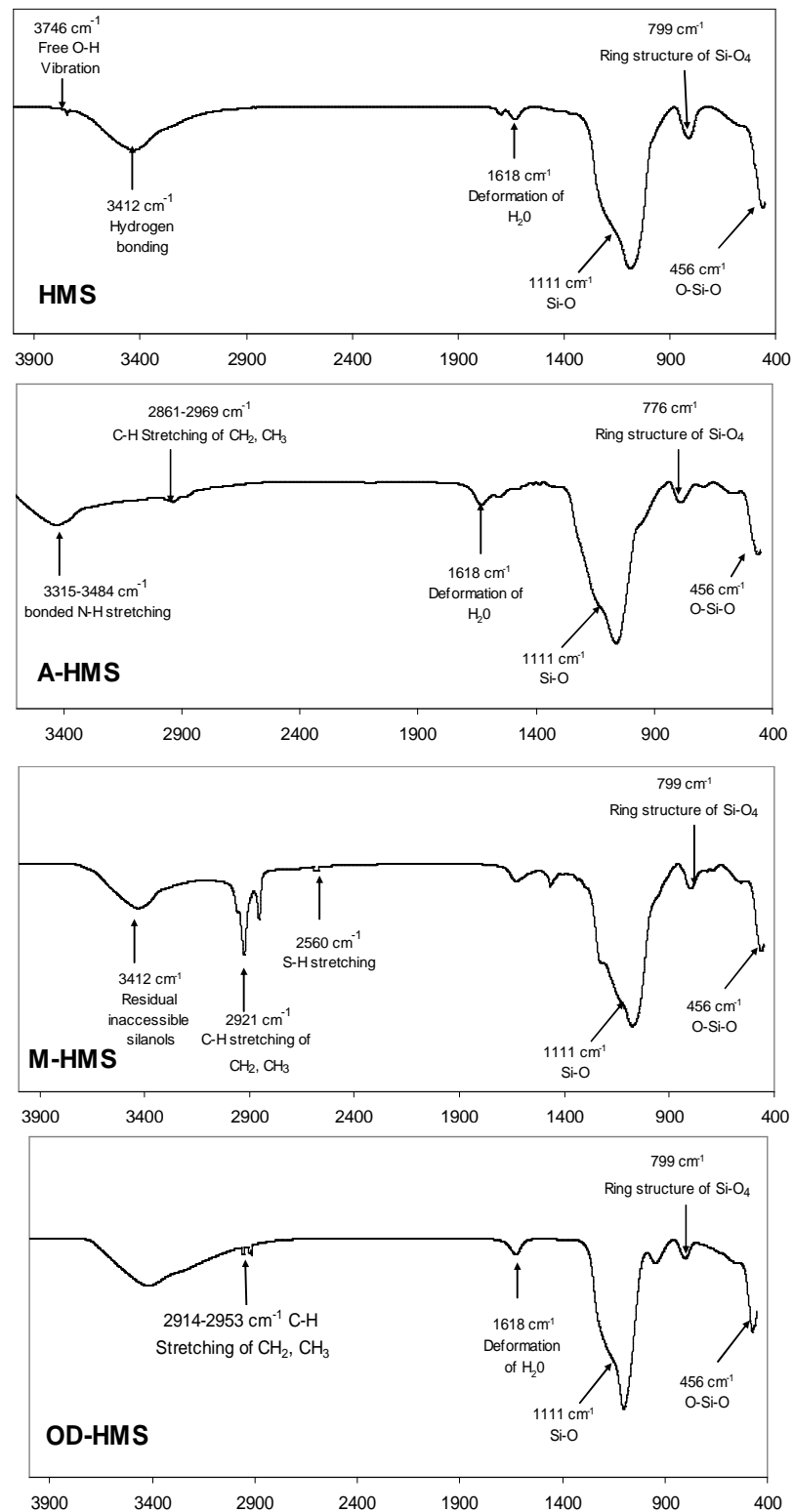
2.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับชนิดมีไซพอร์สซิลิเกตตั้งต้นและที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค FT-IR spectroscopy ซึ่งสเปกตรัมที่วัดได้เกิดจากการสั่นของพันธะเคมีที่อยู่ในโมเลกุลของตัวกลางดูดซับในช่วงความถี่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับธาตุและชนิดของพันธะ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 2.5

จากภาพที่ 2.5 พบว่า พีคที่ความถี่ $3,400\text{ cm}^{-1}$ และ 3746 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching สามารถบอกได้ว่าตัวดูดซับมีไซพอร์สซิลิเกตมีหมู่ซิลานอลและซิลานอลอิสระตามลำดับ อยู่บนพื้นผิว และพีคที่ความถี่ $1,110\text{ cm}^{-1}$ และ 799 cm^{-1} รวมถึง 466 cm^{-1} แสดงถึง Si-O stretching, Si-O_4 stretching และ O-Si-O stretching ที่ชี้บ่งถึงโครงสร้างหลักของมีไซพอร์สซิลิเกต สำหรับมีไซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ A-HMS, M-HMS และ OD-HMS จะมีพีคของ C-H stretching ในช่วงความถี่ $2,850\text{ cm}^{-1}$ ถึง $2,965\text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้พีคที่ความถี่ 2560 cm^{-1} แสดงถึง S-H stretching ของหมู่เมอร์แคปโต อย่างไรก็ตามพีคของ N-H stretching ที่เกิดขึ้นช่วงความถี่ $3,300\text{ cm}^{-1}$ ถึง $3,400\text{ cm}^{-1}$ (Li et al., 2008) ในสเปกตรัมของหมู่อะมิโนไม่สามารถระบุได้ เนื่องช่วงความถี่ดังกล่าวถูกบดบังด้วยการดูดซับทางกายภาพของน้ำบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

2.4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์

เพื่อยืนยันผลการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ได้แก่ หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโตบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ทำการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนโดยเทคนิค Autocave digestion ซึ่งทำการย่อยด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate) ในสภาวะต่างและวัดปริมาณซัลเฟอร์ด้วยเครื่อง Sulfur analyzer พบว่า ปริมาณไนโตรเจนของ A-HMS เท่ากับร้อยละ 3.315 ปริมาณซัลเฟอร์ของ M-HMS เท่ากับร้อยละ 7.47 และปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของหมู่ฟังก์ชันผสมเท่ากับร้อยละ 0.77 และ 5.99 ตามลำดับ (Parat., 2011 ; ชูติมา, 2551) ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยืนยันการต่อติดของหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวบนตัวกลางดูดซับ

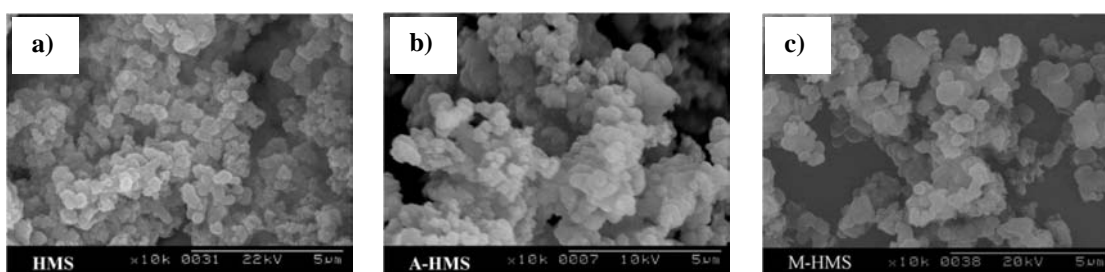


ภาพที่ 2.5 สเปกตรัม FT-IR แสดงหมู่ฟังก์ชันของ HMS, A-HMS, M-HMS และ OD-HMS

(Parat., 2011)

2.4.5 ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยา (Particle size and morphology)

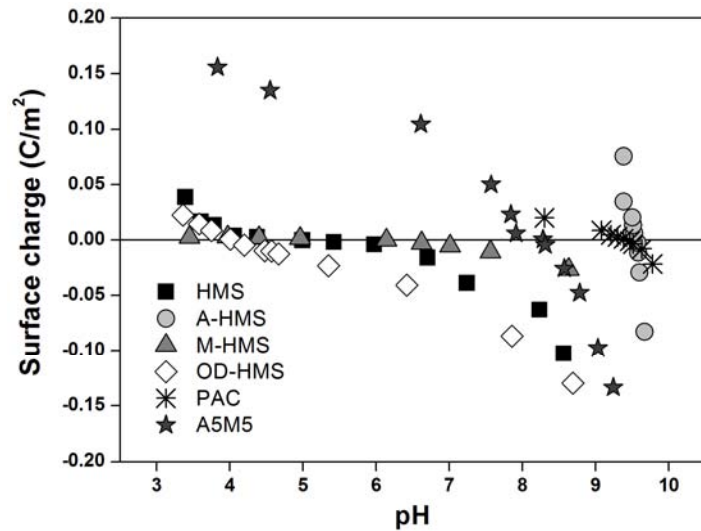
ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค Scanning electron microscopy จากภาพที่ 2.6 พบว่า ขนาดอนุภาคของ HMS มีอนุภาคค่อนข้างกลมประมาณ 0.1 ไมโครเมตร และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งขนาดและสัณฐานวิทยาใกล้เคียงกับรายงานที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้ (Aguado et al., 2009) สำหรับตัวดูดซับมีโซพอร์สซิลิกาเกตที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันพบว่า ขนาดอนุภาคของ A-HMS และ M-HMS มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ HMS



ภาพที่ 2.6 ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ (a) HMS; (b) A-HMS; (c) M-HMS (Parat., 2011)

2.4.6 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว (Surface charge)

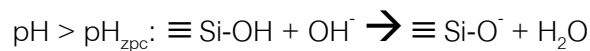
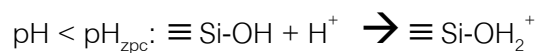
สภาพประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ (Surface charge) วิเคราะห์โดยวิธี Acid-base titration ซึ่งควบคุมให้ความแรงของประจุ (Ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลจะทำการวัดพีเอชของสารละลาย ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวกับค่าพีเอชแสดงดังภาพที่ 2.7 และตารางสรุปค่า pH_{ZPC} แสดงดังตารางที่ 2.10



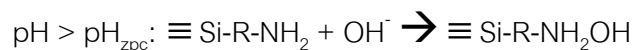
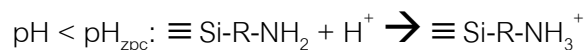
ภาพที่ 2.7 ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และ PAC
(Punyapalakul et al., 2009 ; Punyapalakul and Takizawa, 2006 ; ชูติมา, 2551)

จากภาพที่ 2.7 พบว่าตัวดูดซับมีค่า pH_{ZPC} หมายถึง ค่าพีเอชที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุเท่ากับศูนย์ แตกต่างกันไปเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน โดยค่า pH_{ZPC} ของ HMS, A-HMS, M-HMS, OD-HMS, A5M5 และ PAC เท่ากับ 4.5-5.0, 9.5, 6.2, 4.0, 8.6 และ 9.5 ตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของประจุลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากช่วงกรดไปถึงช่วงด่าง ซึ่งหมู่ซิลานอลและหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนพื้นผิวจะมีการได้รับและสูญเสียโปรตรอน จึงทำให้ประจุบนพื้นผิวมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งปฏิกิริยาของการเกิดสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

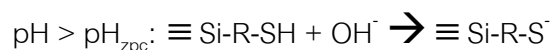
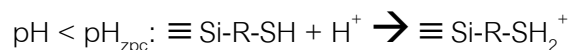
HMS:



A-HMS:



M-HMS:



2.4.7 สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ (hydrophilicity/hydrophobicity) ของตัวกลางดูดซับใช้เทคนิค Powder contact angle ในการวิเคราะห์ โดยค่า contact angle (θ) สูง แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.10 จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวกลางดูดซับส่วนใหญ่มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity surface) โดย HMS และ A-HMS มีค่า water contact angle (θ) เท่ากับ 45.06 และ 40.18 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวดูดซับที่ต่อติดหมู่ฮัคคิล (OD-HMS) หมู่เมอร์แคปโต (M-HMS) และ PAC กลับมีความไม่ชอบน้ำสูงกว่า โดยมีค่า water contact angle (θ) เท่ากับ 89.83, 89.65 และ 58.34 ซึ่งค่าความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำดังกล่าวอาจส่งผลต่อกระบวนการดูดซับได้

ตารางที่ 2.10 ค่า pH_{ZPC} และค่าความชอบน้ำ (Water contact angle) ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน	pH_{ZPC}	Water contact angle (θ)
HMS	ซิลานอล	4.5-5.0 ^a	45.06 ^c
A-HMS	อะมิโน และซิลานอล	9.5 ^a	40.18 ^c
M-HMS	เมอร์แคปโต และซิลานอล	6.2 ^a	89.65 ^c
OD-HMS	ฮอกทิล และซิลานอล	4.0 ^b	89.83 ^c
A5M5	อะมิโน เมอร์แคปโต และซิลานอล	8.6 ^d	NM
PAC	คาร์บอนิล ฟีนิล และอื่นๆ	9.5 ^a	58.34 ^c

^a อ้างอิง (Punyapalakul et al., 2009).

^b อ้างอิง (Punyapalakul and Takizawa, 2006).

^c อ้างอิง (Parat., 2011)

^d อ้างอิง (ชุตินา, 2551)

NM: Not measured

จากการวิเคราะห์สมบัติการกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ สามารถสรุปสมบัติทางกายภาพและเคมีได้ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน	ขนาดรูพรุน (nm)	S_{BET} (m^2/g)	V_p (mm^3/g)	pH_{ZPC}	Density of functional group(%)	Contact angle (θ)	ความชอบน้ำ / ไม่ชอบน้ำ
HMS	Silanol	2.60 ^a	712 ^a	773 ^a	4.5-5 ^a	-	45.06 ^c	Hydrophilic ^c
A-HMS	Amine, Silanol	3.95 ^a	262 ^a	147 ^a	9.5 ^a	3.32 ^c	40.18 ^c	Hydrophilic ^c
M-HMS	Mercapto, Silanol	2.48 ^a	912 ^a	433 ^a	6.2 ^a	7.47 ^c	89.65 ^c	Hydrophobic ^c
OD-HMS	Octyl, Silanol	2.36 ^b	476 ^b	499 ^b	4.0 ^a	-	89.83 ^c	Hydrophobic ^c
A5M5	Amine, Mercapto, Silanol	2.60 ^d	426 ^d	220 ^d	8.6 ^d	-	-	Hydrophilic ^d
PAC	Carboxyl, Phenyl and others	1.90 ^a	980 ^a	276 ^a	9.5 ^a	-	58.34 ^c	Hydrophobic ^c

^a อ้างอิง (Punyapalakul et al., 2009).

^b อ้างอิง (Punyapalakul and Takizawa, 2006).

^c อ้างอิง (Parat., 2011)

^d อ้างอิง (ชุตินมา, 2551)

2.5 การดูดซับ

2.5.1 หลักการของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็ง ซึ่งก็คือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับนี้จะไม่รวมถึงกระบวนการการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้

ความเข้มข้นของสารลดลงไปนั้น เกิดจากกระบวนการดูดซับ กระบวนการโพลีเมอร์ไรซ์เซชัน หรือจากกระบวนการอื่นๆ แล้ว อาจเรียกกระบวนการนี้ว่า sorption process

มีการนำเอาการดูดซับไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งในอุตสาหกรรมและงานด้านสิ่งแวดล้อม

สำหรับแรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แรง คือ

1. แรงทางกายภาพ (Physical waal's force) ประกอบด้วย

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายซับ (Desorption) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2) แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

3) แรงทางเคมี (chemical force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับ แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (irreversible)

ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของเหลวนั้น สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate)

2.5.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของพลังงาน หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attractive force) อย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับถูกทำให้เกาะติดแน่นอยู่กับโมเลกุลของสารดูดซับ โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหลายๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดก่อน โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพนี้ทำให้เกิดส่วนที่หนา และผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพ ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยการคายซับ (desorption) จะสามารถเกิดขึ้นได้

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption) จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงาน

พันธะเคมี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้ จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้

ความแข็งแรงของแรงดึงดูด สามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยน หรือใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าที่สำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่ 1 แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว และถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไม่มากนัก พบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น และใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

2.5.3 กลไกของการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ
2. การแพร่ภายใน เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกริยาพื้นผิว เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละลายได้

การแพร่ภายนอก (External Diffusion)

ขั้นตอนนี้เป็นการส่งมวลของสารที่ถูกดูดซับจากสารละลายไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ หรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ มวลสารที่ถ่ายโอนเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dq}{dt} = k_f S(c - c^*)$$

เมื่อ q = ปริมาณของสารดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

t = ระยะเวลา

k_f = mass transfer coefficient (external)

S = พื้นที่ผิวของสารดูดซับ

c = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย

c^* = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวหน้าของแข็ง

การแพร่ภายใน (Internal Diffusion)

คือการถ่ายโอนมวลสารจากมวลสารที่ถูกส่งถ่ายเข้ามาสู่บริเวณพื้นผิวรอบๆ ของสารดูดซับเข้าสู่ภายในรูพรุนซึ่งมีพื้นผิวเป็นจำนวนมากสำหรับการดูดซับ

$$\frac{dq}{dt} = K_D a_v (q - q^*)$$

เมื่อ q^* = ปริมาณของสารดูดซับที่สมดุลกับ c^*

a_v = พื้นที่ผิวของสารดูดซับที่เกิดการส่งถ่ายมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ

ขั้นตอนการดูดซับ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำ หรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับติดผิวชั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

4) การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังสารดูดซับ

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาด และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรง กับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนถูกควบคุม

โดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

2. ลักษณะของสารดูดซับ

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายนอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

3. ความปั่นป่วน (Turbulent)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งของโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4. เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุดในขั้นนี้ขึ้นกับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายนั้น เป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และ ไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

2.5.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับ ออกสู่สารละลายจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ จุดนี้เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ณ จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของทั้งระบบ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับหรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็สารที่ถูกดูดซับ สารดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุล เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายรูปแบบ รูปร่างของไอโซเทอมของการดูดซับนั้นจะบอกถึงข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้น และบ่งบอกลักษณะการดูดซับของพื้นที่ผิวของสารดูดซับในขณะที่เกิดการดูดซับ

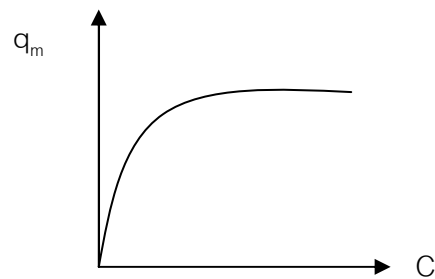
ไอโซเทอมที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทางทฤษฎีของการดูดซับ มีอยู่ 3 แบบ คือ

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)
การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่า
 - 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
 - 2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
 - 3) พื้นที่ของบริเวณที่เกิดการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
 - 4) พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงได้ดังสมการ

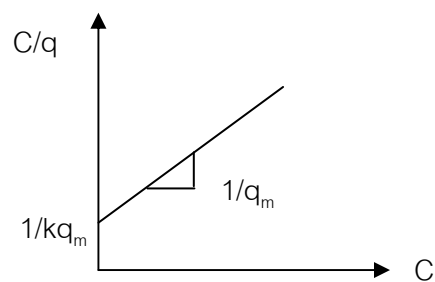
$$q = \frac{(q_m kC)}{(1 + kC)}$$

- เมื่อ q = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ
(มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)
- q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะ
สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)
- C = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย
(มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)
- k = ค่าคงที่ของการดูดซับ



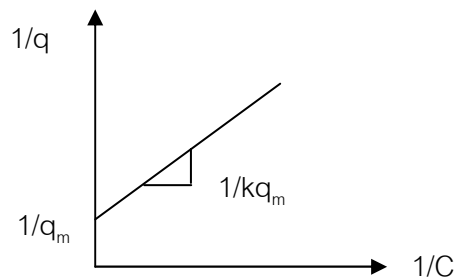
เมื่อ q เข้าสู่ q_m และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{kq_m} + \frac{C}{q_m}$$



เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C/q กับ C จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $1/q_m$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/kq_m$ เมื่อหารด้วย C จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{C} \frac{1}{kq_m}$$



เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $1/kq_m$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/q_m$

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

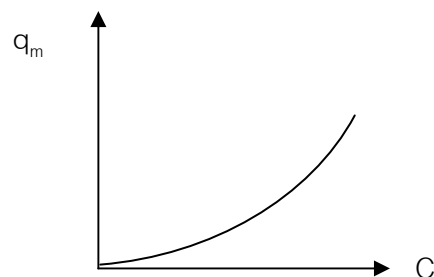
ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิชเป็นไอโซเทอมที่ได้รับความนิยมอย่างมาก มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อนำมาอธิบายเกี่ยวกับการดูดซับ มีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{X}{m} = KC^n$$

เมื่อ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ
(มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

m = น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)

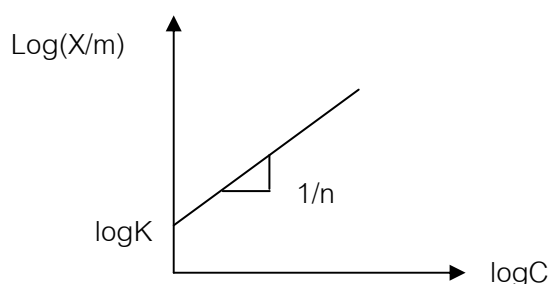
K และ $1/n$ = ค่าคงที่ของการดูดซับ



จาก

$$\frac{X}{m} = KC^n$$

$$\log \frac{X}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C$$



เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(X/m)$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\log K$ ของ $\log(X/m)$ ที่ $\log C = 0$ ($C = 1$)

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช จะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี แต่หากค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 จะแสดงถึงการดูดซับที่ดี และหากเส้นกราฟมีความชันมากแสดงว่าสารดูดซับนั้นสามารถเกิดการดูดซับได้ดีความเข้มข้นสูงๆ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต

Lee และคณะ (2001) ทำการสังเคราะห์สารตัวกลางดูดซับซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือ หมู่เมอร์แคปโตและหมู่อะมิโน เพื่อนำไปกำจัดโลหะหนักในสารละลาย โดยใช้สารเคมีในการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ คือ โดเดซิลลามีนและเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ทำการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันต่อสมบัติของสารตัวกลางดูดซับ พบว่า ลิแกนด์หมู่อะมิโนจะเพิ่มสมบัติความชอบน้ำแก่สารตัวกลางดูดซับ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับสูงและมีสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับไอออนของปรอทในสารละลายอีกด้วย

2. การใช้มีโซพอร์สซิลิเกตในการดูดซับมลสารต่างๆ

Newalker และคณะ (2003) ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ อีเทน เอทิลีน อะเซทิลีน โพรเพน และโพรพิลีน โดยใช้เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตเป็นสาร

ตัวกลางดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช พบว่าความสามารถในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 2 และ 3 ตัว ที่เป็นไซตรงจะสูงกว่าอัลเคนชนิดอื่น นอกจากนี้ปริมาณของอะเซทิลีนเปรียบเทียบกับแล้วมีมากกว่าเอทิลีน การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสารไฮโดรคาร์บอนผสม พบว่า เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตมีความสามารถในการดูดซับโพรพิลีนสูงสุด และสูงกว่าโพรเพน สามารถบ่งชี้ได้ว่า เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 3 โมเลกุล

Punyapalukul และ Takizawa (2004) ทดสอบการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกความเข้มข้นสูง (0-100 มก./ล) บนเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต 5 ชนิด ที่กราฟท์หมู่ฟังก์ชัน 3 ชนิด ได้แก่ OD-HMS, AM-HMS และ MP-HMS และชนิดที่มีการแทนที่ด้วยไทเทเนียม (Ti-HMS) HMSs อีกชนิด คือ เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือ หมู่อะมิโน และหมู่เมอร์แคปโต และศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นพบว่า สมบัติทางกายภาพไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกแต่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับนั้น เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบเนื่องจาก สามารถเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต ประจุลบของกรดไดคลอโรอะซิติกจะถูกดูดซับได้เฉพาะเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่เป็นประจุบวก ได้แก่ ตัวกลางดูดซับที่มีหมู่อะมิโน จะทำให้มีความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกสูง ส่วนตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่จะดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกได้สูงเช่นกัน ในขณะที่ประจุบนพื้นผิวต่ำกว่าตัวกลางดูดซับที่มีหมู่อะมิโนเพียงหมู่เดียว ในช่วงความเข้มข้นของกรดไดคลอโรอะซิติกที่ต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับประจุบนพื้นผิว ดังนั้นสารดูดซับที่มีประจุบวกบนพื้นผิวสูงจะดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกดี

Punyapalukul และ Takizawa (2006) นำเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต 5 ชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างกัน มาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์มลพิษทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ 2,4-D, เมอร์โคพروف, 4-คลอโรฟีนอล, โทลูอีน, กรดไดคลอโรอะซิติก และไทโอพลาวิน ที่ ในน้ำเสียสังเคราะห์ การเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้แก่เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต ไม่ได้เพิ่มความสามารถในการดูดซับสารไม่ชอบน้ำเสมอไป การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์จะเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต ซึ่งจะเป็นการเพิ่มแรงค้ำยไฟฟ้าระหว่างตัวกลางดูดซับและสารมลพิษ สารที่มีประจุเป็นลบ ได้แก่ 2,4-D, เมอร์โคพروف และ กรดไดคลอโรอะซิติกจะถูกดูดซับได้ดีบน AM-HMS ซึ่งเป็นประจุบวกเนื่องมาจากแรงค้ำยไฟฟ้า พันธะไฮโดรเจนและแรง

แวนเดอวาลส์ระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ทั้ง 2 ปัจจัยร่วมกันนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต นอกจากนี้แรงศักย์ไฟฟ้าในการดูดซับ ไทโอฟลาวิน ที่ เกิดเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอวาลส์ สำหรับพื้นผิวที่มีความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำตามลำดับ

ชุตติมา (2551) สังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตและปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต รวมทั้งแทนที่ธาตุโลหะไทเทเนียมในโครงสร้างผลึก ศึกษาความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก 5 ชนิด เข้มข้นต่ำ (0-200 µg/l) พบว่า กรดโมโนคลอโรอะซิติกที่มีธาตุฮาโลเจน 1 อะตอมถูกดูดซับได้ดีที่สุด ความสามารถในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงยังคงสูงกว่า ความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก แบบผสมโดยถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีต่ำกว่ามีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ เนื่องจากเกิดการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ ประจุในน้ำประปามีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกทั้ง 5 ชนิด โดย PAC

3. การเกิดไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา

Panyapinyopol (2004) มีการศึกษาศักยภาพของการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน ของน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาโดยรายงานถึงศักยภาพการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THMFP) ของน้ำดิบใช้วิธีการวิเคราะห์มาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสียของประเทศสหรัฐอเมริกา (ทำปฏิกิริยากับคลอรีน 7 วัน ที่ค่าคลอรีนคงเหลือเท่ากับ 3-5 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยเก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้าสู่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาบางเขน ผลการทดลองพบว่า มีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานค่อนข้างมาก โดยมีค่า THMFP เท่ากับ 313 ไมโครกรัมต่อลิตร เนื่องจากปกติแล้วน้ำประปาจะอยู่ในเส้นท่อไม่เกิน 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับสภาพของระบบจ่ายน้ำประปามากขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงศักยภาพการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยากับคลอรีน 24 ชั่วโมง ที่ค่าคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเก็บตัวอย่างน้ำดิบในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 พบว่าศักยภาพการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนยังคงมีค่าสูงถึง 224 ไมโครกรัมต่อลิตร

4. การกำจัดไตรฮาโลมีเทน

Uyak และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดไตรฮาโลมีเทน จากเทคนิค NF ด้วยเยื่อเลือกผ่าน NF 200 และ DS5 มีการผันแปรความเข้มข้นโดยเปลี่ยนแรงกดดันในการส่งผ่านเยื่อเลือกผ่าน (transmembrane pressure) เยื่อเลือกผ่าน NF 200 สามารถกำจัดไตรฮาโลมีเทน

ได้มากกว่าเยื่อเลือกผ่าน DS5 ประสิทธิภาพในการกำจัด DBCM สูงสุดเนื่องจากองค์ประกอบของไบรมีน (มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและขนาดของโมเลกุลใหญ่สุด)

Shemer และ Narkis (2004) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน 5 ชนิด คือ CHCl_3 , CHBrCl_2 , CHBr_2Cl , CHBr_3 และ CHI_3 โดยการย่อยสลายด้วยเสียง ใช้ความถี่อัลตราโซนิก 20 กิโลเฮิร์ต ความเข้มเสียง 3.75 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเสียงของสารไตรฮาโลมีเทนแต่ละชนิดเป็นดังนี้ $\text{CHCl}_3 > \text{CHBrCl}_2 > \text{CHBr}_2\text{Cl} > \text{CHBr}_3 > \text{CHI}_3$ สามารถกำจัด CHCl_3 ได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ความดันไอของสารไตรฮาโลมีเทนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและค่าไคเนติกของการย่อยสลายด้วยเสียงในขณะที่พลังงานที่ใช้ในการแยกพันธะ และลักษณะสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของสารประกอบไตรฮาโลมีเทน เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมา

5. การดูดซับไตรฮาโลมีเทน

Lu และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนจากน้ำ โดย CNTs ปรับปรุงด้วยกรด ทำให้พื้นผิวมีความชอบน้ำและเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และค่อนข้างมีขั้วของโมเลกุลไตรฮาโลมีเทน การดูดซับของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนเข้าภายใน CNTs แปรผันต่ำในระหว่าง pH 3-7 แต่ลดลงที่ pH มากกว่า 7 การศึกษาการเปรียบเทียบระหว่าง CNTs และ PAC ให้ผลไปในทางเดียวกันคือ สามารถดูดซับ CHCl_3 มากที่สุด

Morawski และคณะ (1997) ศึกษาการดูดซับไตรฮาโลมีเทนจากน้ำโดยใช้คาร์บอนสเฟียร์ (APT, APT-P และ GP-30) ซึ่งสังเคราะห์จากฟีนอลเรซิน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสในสภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ (APT และ APT-P) แต่ GP-30 จะเผาในสภาวะก๊าซไนโตรเจน APT, APT-P และ GP-30 มีพื้นที่ผิว 307.5, 125.67 และ 2.4 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ และสามารถดูดซับสารไตรฮาโลมีเทน 125.67, 77.02 และ 40.02 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

Morawski และคณะ (2000) ศึกษาการดูดซับไตรฮาโลมีเทนโดยใช้คาร์บอนสเฟียร์ซึ่งสังเคราะห์จาก ฟีนอลเรซินมาเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ ได้ตัวดูดซับที่เรียกว่า APT สามารถดูดซับคลอโรฟอร์ม 0.33 ไมโครโมลต่อกรัม เมื่อนำ APT มาออกซิไดซ์ด้วยกรดไนตริก ได้ตัวดูดซับที่เรียกว่า NAP-T สามารถดูดซับไตรฮาโลมีเทนได้มากขึ้น เท่ากับ 2.5 ไมโครโมลต่อกรัม และตัวดูดซับที่สามารถดูดซับได้สูงสุดคือ การนำ NAP-T มาออกซิไดซ์ในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศา

เซลล์เย็บส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (44-APT) ซึ่งสามารถดูดซับคลอโรฟอร์มได้สูงสุด 18.4 ไมโครโมลต่อกรัม

6. สรุป

จากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งมีทั้งแบบหมู่ฟังก์ชันเดี่ยว และ 2 หมู่ฟังก์ชัน โดยหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ได้แก่ หมู่เมอร์แคปโต และหมู่อะมิโน เพื่อปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ สามารถดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนและมลสารขนาดเล็ก ที่มีทั้งสมบัติความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำสูงได้ดี นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคชนิดฮาโลอะซีติก แอซิด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ตัวกลางดูดซับชนิดนี้ในการดูดซับสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคชนิดไตรฮาโลมีเทนออกจากน้ำ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่อง X-ray diffraction Spectrometer, XRD (Diffractometer; Bruker AXS Model D8)
2. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR (Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy Nicolet Impact 410)
3. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน BET
4. เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04H)
5. เครื่อง Scanning Electron Microscope
6. เครื่อง Gas Chromatograph, GC/ECD (Agilent GC6890)
7. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
8. เครื่องเขย่า (Labcon)
9. เครื่องวัดพีเอช (Sartorius PB-10)
10. ตู้อบ
11. เต้าเผา
12. ตู้ดูดควัน
13. กระดาษกรอง GF/C
14. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
15. ชุดสกัดแบบซอกซ์เลต
16. เม็ดแก้ว
17. เครื่องแก้วที่จำเป็น
18. ไมโครปิเปต
19. Heating Block
20. Microsyringe

3.1.2 สารเคมี

1. ไดเดซิลลามีน ($C_{12}H_{27}N$) (AR Grade,Acros)
2. เอทานอล (C_2H_6O) (AR Grade,Merck)
3. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ($SiC_8H_{20}O_4$) (AR Grade,Fluka)
4. 3-เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกรีไซเลน ($C_6H_{16}O_3Si$) (AR Grade,Aldrich)
5. 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกรีไซเลน ($C_9H_{23}NO_3Si$) (AR Grade,Fluka)
6. ไดมethylคลอโรไซเลน ($C_{10}H_{23}ClSi$) (GC Grade, Fluka)
7. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Na_2SO_4) (AR Grade,Carlo Erba)
8. n-pentane (C_5H_{12}) (HPLC Grade,Lab Scan analytical Sciences)
9. เมทานอล (CH_3OH) (AR Grade,Merck)
10. น้ำกลั่น (Distilled water)
11. น้ำดีไอออไนซ์ (Deionized water)
12. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 (Japan Envirochemicals Ltd.)
13. น้ำประปา

3.2 แผนการทดลอง

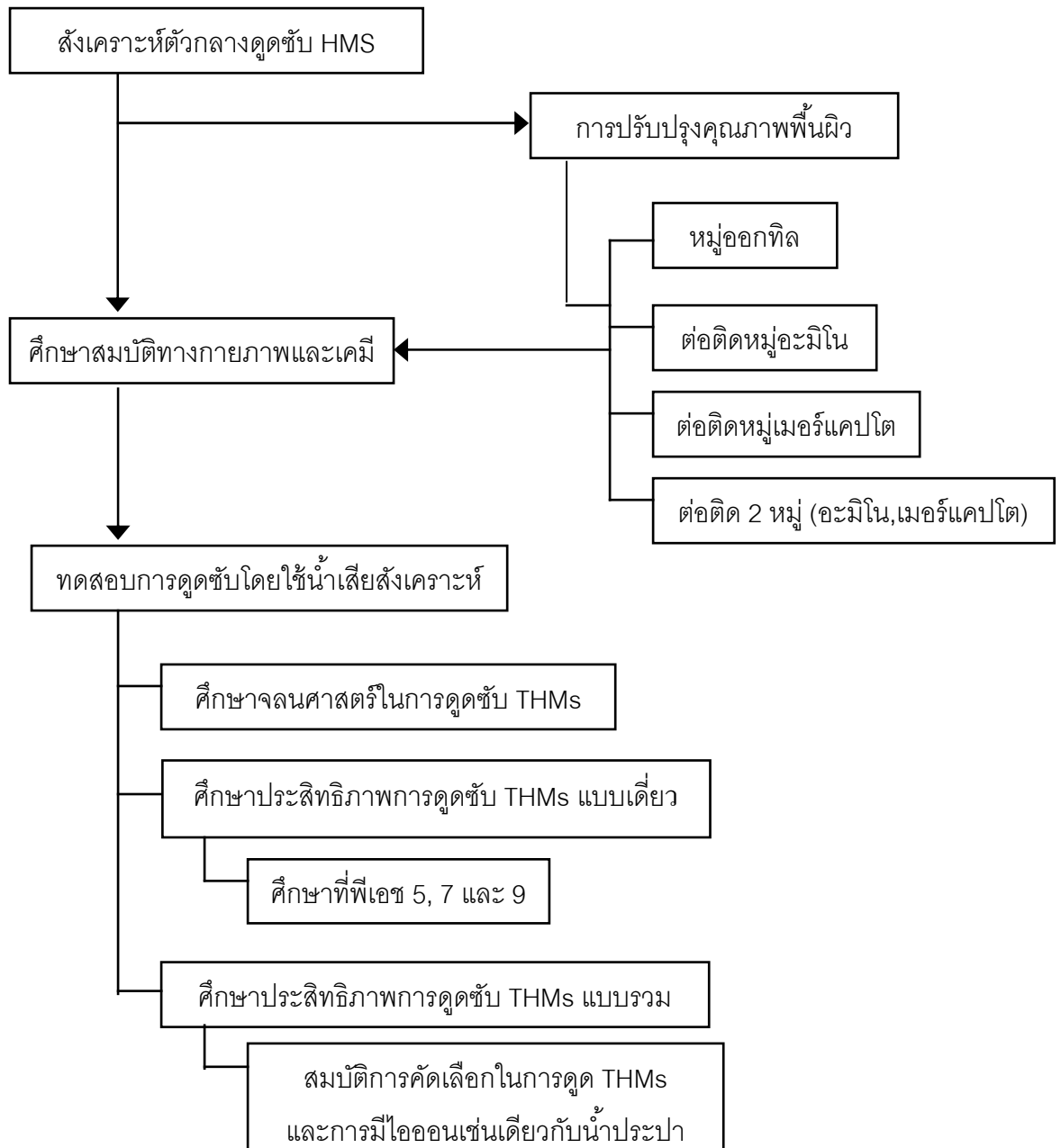
การวิจัยครั้งนี้จะดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับทั้งหมด 5 ชนิด จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น และทดสอบการดูดซับโดยใช้สารละลายสังเคราะห์

การปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่ออกทิล หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต ซึ่งต่อติดแบบหมู่ฟังก์ชันเดี่ยวและแบบ 2 หมู่ฟังก์ชัน จากนั้นจะทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ และนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับเช่นเดียวกัน

ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับ จะทำโดยการทดลองแบบทีละเท (Batch) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$,TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน ($CHBr_3$,TBM) ทำการทดลองแยกเป็น 2 กรณี คือ ทดสอบประสิทธิภาพแบบเดี่ยว และทดสอบ

ประสิทธิภาพแบบรวม โดยควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ พีเอชและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในน้ำสังเคราะห์ และทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

แผนการทดลองในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 3.1

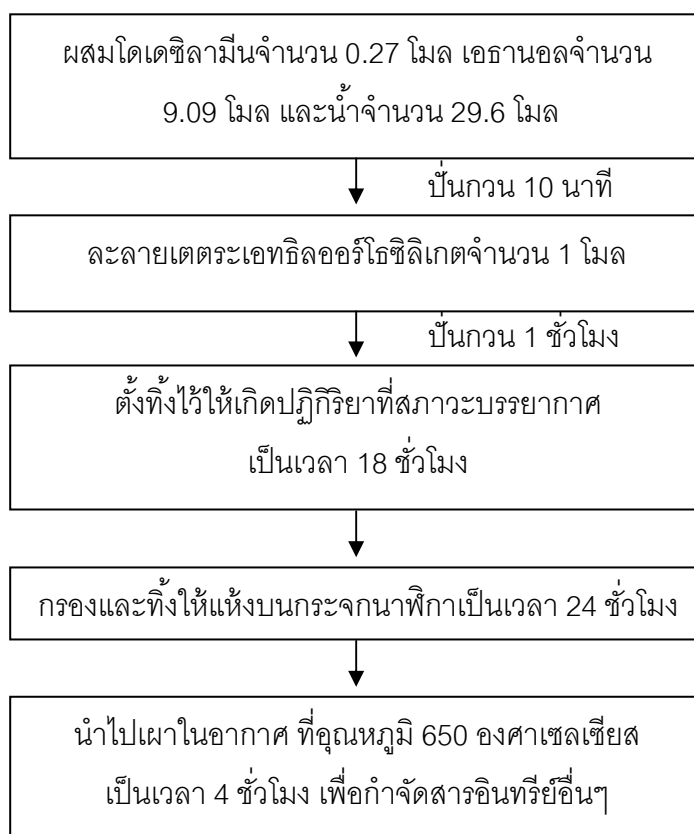


ภาพที่ 3.1 แผนการทดลองในการดำเนินการวิจัย

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ (Hexagonal Mesoporous Silicate, HMS)

ในการสังเคราะห์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะมีการใช้พันธะไฮโดรเจนและการรวมตัวระหว่างสารเอมีนปฐมภูมิ และสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น คือ โดเดซิลามีน และเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดผลึก และเป็นแหล่งของซิลิกา ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีการใช้เอทานอล เป็นตัวทำละลายร่วมตามอัตราส่วนต่างๆ วิธีการสังเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.2

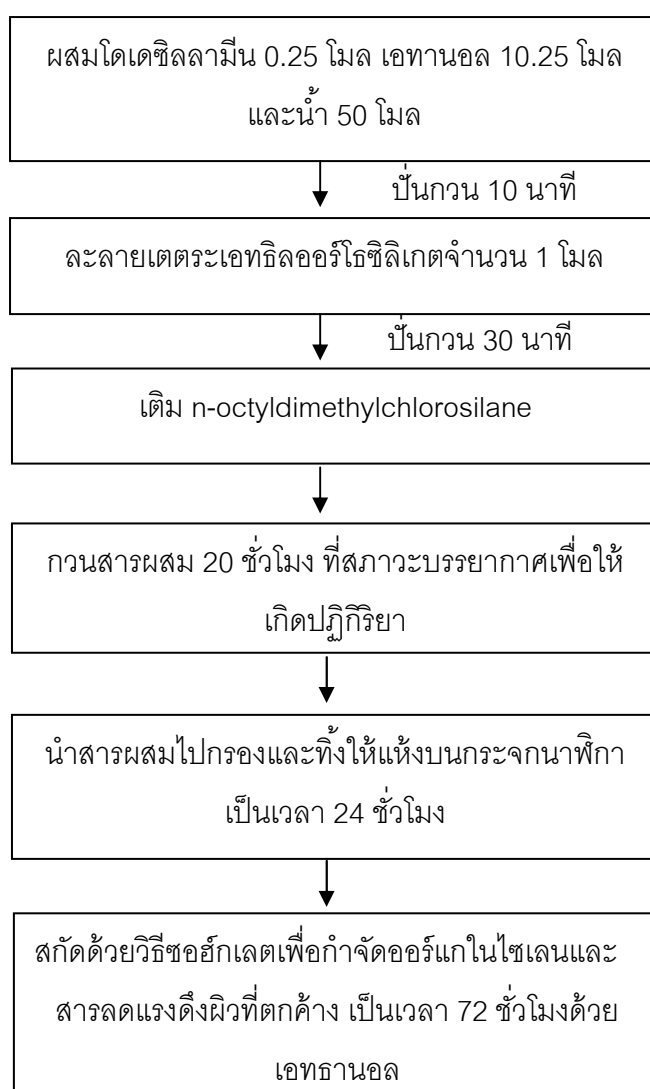


ภาพที่ 3.2 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์ซิลิเกต (HMS) (Tanev และคณะ, 1995)

3.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวกลางดูดซับ

1. การต่อติดด้วย n-octyldimethylchlorosilane (OD-HMS)

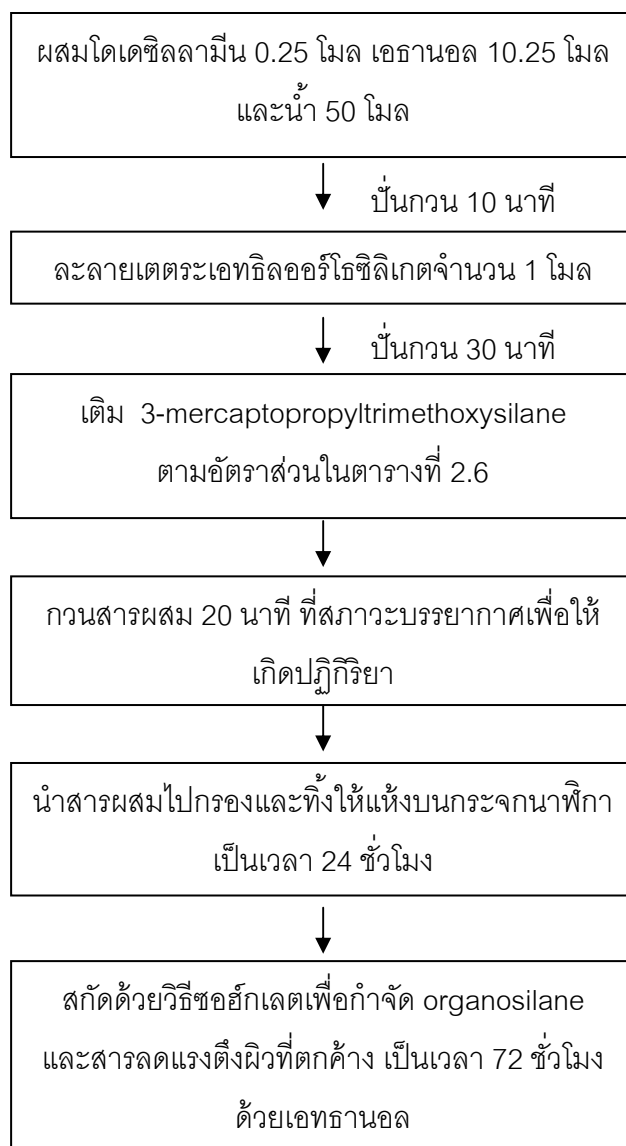
การเพิ่มหมู่ซิลิโคนให้แก่อะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตโดยการต่อติดด้วย n-octyldichlorosilane จะเป็นการเพิ่มสมบัติความชอบน้ำให้แก่ตัวดูดซับ วิธีสังเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดด้วย n-octyldimethylchlorosilane (OD-HMS) (ชุตินา กัลยาประสิทธิ์, 2551)

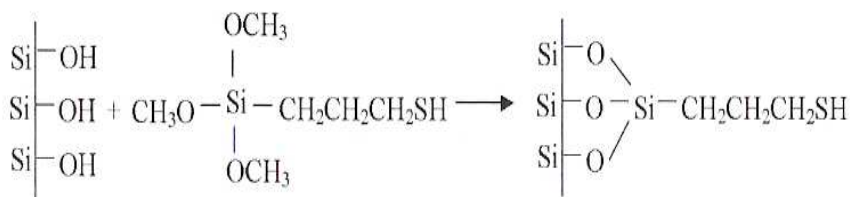
2. การต่อติดด้วยหมู่ 3-mercaptopropyltrimethoxy (M-HMS)

การต่อติดเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต ด้วย 3-mercaptopropyltrimethoxy จะเป็นการเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ ซึ่งมีวิธีสังเคราะห์ดังรูป 3.4



ภาพที่ 3.4 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดด้วย 3-mercaptopropyltrimethoxy (M-HMS) (Lee และคณะ, 2001)

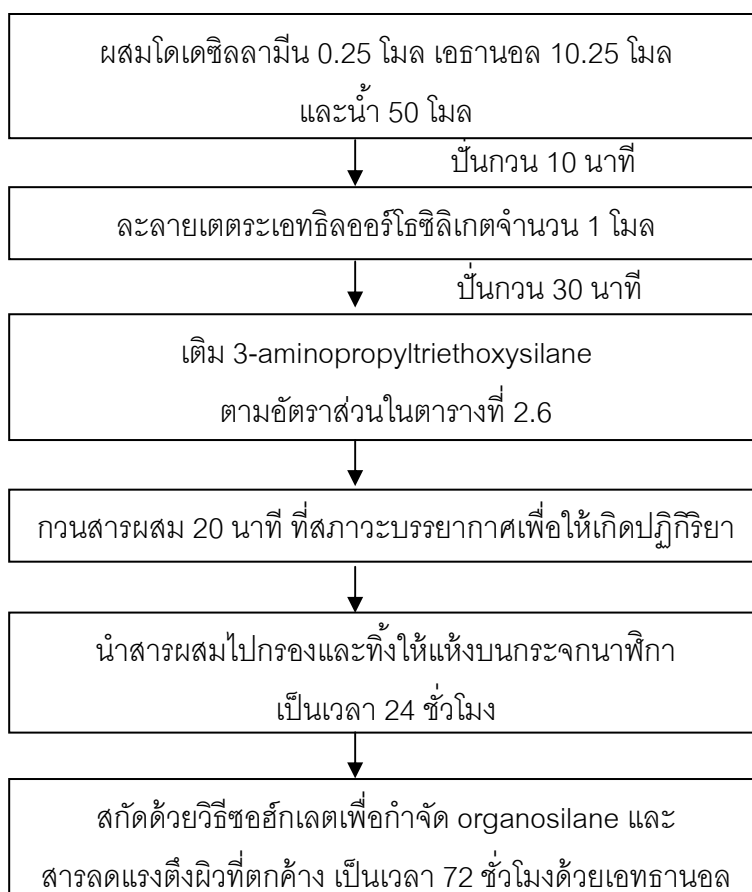
เมื่อทำการต่อติดหมู่เมอร์แคปโตแล้วเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตจะมีโครงสร้าง ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างของเฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่เมอร์แคปโต(M-HMS)

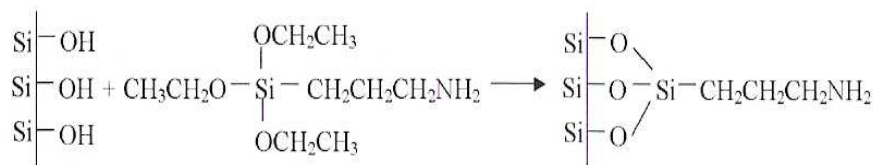
3. การต่อติดด้วย 3-aminopropyltriethoxy (A-HMS)

การเพิ่มหมู่อะมิโนให้แก่เฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตโดยการต่อติดด้วย 3-aminopropyltriethoxy จะเป็นการเพิ่มสมบัติความชอบน้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ วิธีสังเคราะห์แสดงดังรูป 3.6



ภาพที่ 3.6 การสังเคราะห์เฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติด 3-aminopropyltriethoxy (A-HMS) (Lee และคณะ, 2001)

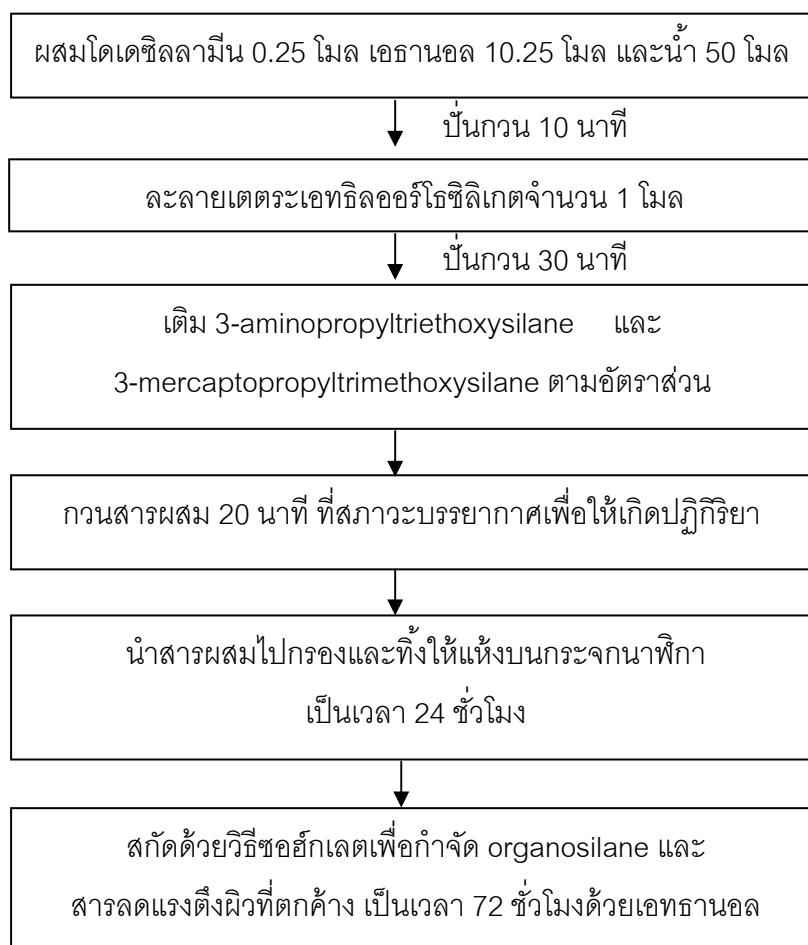
ลักษณะโครงสร้างของ เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต ที่ทำการต่อติดด้วยหมู่ 3-aminopropyltriethoxy (A-HMS) แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.7 โครงสร้างของเฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโน(A-HMS)

4. การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่คือหมู่อะมิโนและเมอร์แคปโต

การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่คือหมู่อะมิโนและเมอร์แคปโต ทำตามวิธีการของ Lee และคณะ (2001) โดยมีขั้นตอนดังภาพที่ 3.7

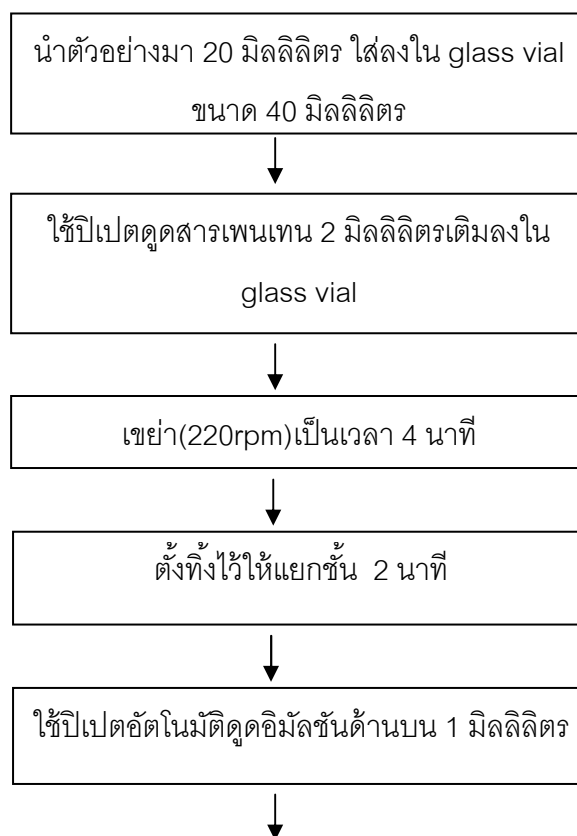


ภาพที่ 3.8 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (Lee และคณะ, 2001)

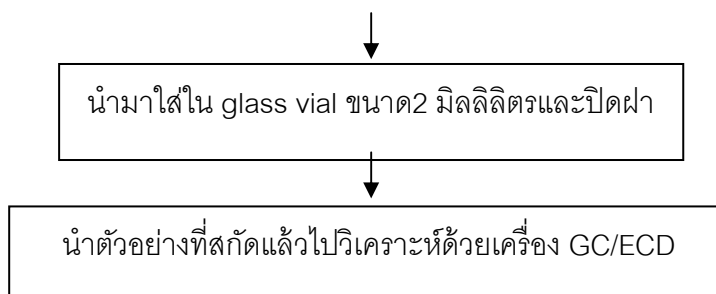
3.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบไตรฮาโลมีเทน (THMs)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบไตรฮาโลมีเทนทำตามวิธี EPA method 551.1 ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ 2 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 3.8

1. ขั้นการสกัด



2. การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบไตรฮาโลมีเทน



ภาพที่ 3.9 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไตรฮาโลมีเทน (EPA method 551.1, 1990)

3.3.4 การศึกษาการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

1. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของไตรฮาโลมีเทนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ
 - 1.1 ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีน้ำตัวอย่างที่มีคลอโรฟอร์ม (TCM) เข้มข้น 500 ppb จำนวน 30 มิลลิลิตร
 - 1.2 ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
 - 1.3 นำขวดรูปชมพู่ไปแช่ใน water bath โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
 - 1.4 เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาดั้งแต่ 0 - 24 ชั่วโมง โดยกรองเอา HMSs ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C
 - 1.5 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ EPA method 551.1
 - 1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1-1.5 โดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่าง เป็นโบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และโบรโมฟอร์ม (TBM)
 - 1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1-1.6 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับ เป็น M-HMS, A-HMS, A5M5-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง(PAC)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาจลนศาสตร์ของไตรฮาโลมีเทน บนพื้นผิวของสารตัวกลาง
ดูดซับ

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - เวลา - ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ - ชนิดของไตรฮาโลมีเทน 	<ul style="list-style-type: none"> - 0, 1, 3, 7, 30, 60 นาทีจากนั้นเก็บตัวอย่าง ทุกๆ 2 ชั่วโมง - HMS, M-HMS, A-HMS, A5M5-HMS, OD- HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง(PAC) - คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และ โบรโมฟอร์ม (TBM)
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของ ไตรฮาโลมีเทนที่เหลืออยู่ 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - พีเอช - ค่า ionic strength - อุณหภูมิ - ปริมาณตัวกลางดูดซับ/น้ำ เสียสังเคราะห์ - ความเข้มข้นเริ่มต้น 	<ul style="list-style-type: none"> - พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ - ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร - 25 ± 2 องศาเซลเซียส - 0.05 กรัม/ปริมาตร 30 มิลลิลิตร - 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

2. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

2.1 เตรียมน้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำกลั่นที่มี คลอโรฟอร์ม (TCM) เข้มข้น 100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

2.2 ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มี คลอโรฟอร์ม (TCM) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 30 มิลลิลิตร

- 2.3 ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2.4 นำขวดรูปชมพู่ไปแช่ใน water bath โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
- 2.5 กรองเอา HMSs ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C
- 2.6 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ EPA method 551.1
- 2.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1-2.6 โดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็น โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และโบรโมฟอร์ม (TBM)
- 2.8 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1-2.7 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับ เป็น M-HMS, A-HMS, A5M5-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง(PAC)
- 2.9 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ต่อปริมาณสารดูดซับ

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทน	- 100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร
- ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ	- HMS, M-HMS, A-HMS, A5M5-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง(PAC)
- ชนิดของไตรฮาโลมีเทน	- คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM)

ตารางที่ 3.2(ต่อ) ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
- ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทนที่เหลื้ออยู่	- วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- พีเอช	- พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
- ค่า ionic strength	- ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- อุณหภูมิ	- 25±2 องศาเซลเซียส
- ปริมาณตัวกลางดูดซับ	- 0.05 กรัม
- ระยะเวลาในการเขย่า	- 24 ชั่วโมง
- ความเข้มข้นเริ่มต้น	- 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

3. การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

3.1 เตรียมน้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำกลั่นที่มี คลอโรฟอร์ม (TCM) ที่ความเข้มข้น 100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 µg/l

3.2 ชั่งตัวกลางมีโซพอร์สซิลิเกตตัวที่มีประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุดจากการทดลองข้อ 2 ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีคลอโรฟอร์ม (TCM) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 30 มิลลิลิตร

3.3 แปลงค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

3.4 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าใน water bath โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 25±2 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง

3.5 กรองเอา HMSs ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C

3.6 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ EPA method 551.1

3.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1-3.6 โดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็นโบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM)

3.8 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลต่อปริมาณสารดูดซับ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทน - พีเอชของสารละลายตัวอย่าง - ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ 	<ul style="list-style-type: none"> - 100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร - 5, 7 และ 9 - HMS, M-HMS, A-HMS, A5M5-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทนที่เหลืออยู่ 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - ชนิดของตัวกลางดูดซับ - ค่า ionic strength - อุณหภูมิ - ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ - ระยะเวลาในการเขย่า - ความเข้มข้นเริ่มต้น 	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวกลางมีโซฟอรัลซิลิเกตตัวที่มีประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุดจากการทดลองข้อ 2 - ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร - 25 ± 2 องศาเซลเซียส - 0.05 กรัม - 24 ชั่วโมง - 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

4. การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับ

4.1 น้ำกลั่นควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

4.1.1 เตรียมน้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำกลั่น ที่มีสารละลายผสมของ คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM) เข้มข้น 100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 µg/l

4.1.2 ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีน้ำตัวอย่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 25 มิลลิลิตร

4.1.3 ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

4.1.4 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าใน water bath โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง

4.1.5 กรองเอา HMSs ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C

4.1.6 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วย เครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ EPA method 551.1

4.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.1.1-4.1.6 โดยเปลี่ยนสารตัวกลางดูดซับเป็น M-HMS, A-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง(PAC)

4.1.8 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นที่สถานะสมดุล ต่อปริมาณสารดูดซับ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทน - ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ - ชนิดของไตรฮาโลมีเทน 	<ul style="list-style-type: none"> - 100, 200, 300, 350, 400, 450, 500 µg/l - HMS, M-HMS, A-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) - คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM)
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทนที่เหลืออยู่ 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - พีเอช - ค่า ionic strength - อุณหภูมิ - ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ - ระยะเวลาในการเขย่า 	<ul style="list-style-type: none"> - พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ - ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร - 25 ± 2 องศาเซลเซียส - 0.05 กรัม - 24 ชั่วโมง

4.2 ใช้น้ำประปาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.1 วิเคราะห์หาปริมาณไอออนในน้ำประปาได้แก่ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} และ HCO_3^- ด้วยเครื่อง IC และวิเคราะห์ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทน (THMs) ด้วย Gas Chromatograph (GC/ECD)

4.2.2 เตรียมตัวอย่างโดยใช้ น้ำประปาที่มีสารละลายผสมของ คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM) เข้มข้น 100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 µg/l

4.2.3 ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีน้ำ ตัวอย่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 30 มิลลิลิตร

4.2.4 นำขวดรูปชมพู่ไปแช่ใน water bath โดยควบคุมให้อุณหภูมิ เท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

4.2.5 กรองเอา HMSs ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C

4.2.6 นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วย เครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD)

4.2.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.2.1-4.2.6 โดยเปลี่ยนสารตัวกลาง ดูดซับเป็น M-HMS, A-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง(PAC)

4.2.8 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ต่อปริมาณสารดูดซับ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับ เมื่อ เต็มไอออน

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทน - ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ - ชนิดของไตรฮาโลมีเทน 	100, 200, 300, 350, 400, 450 และ 500 $\mu\text{g/l}$ <ul style="list-style-type: none"> - HMS, M-HMS, A-HMS, OD-HMS และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) - คลอโรฟอร์ม (TCM), โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (TBM)
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของไตรฮาโลมีเทนที่เหลืออยู่ 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีของ Standard Method 6232B.

ตารางที่ 3.5(ต่อ) ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อเติมไอออน

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
- พีเอช	- พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
- อุณหภูมิ	- 25 ± 2 องศาเซลเซียส
- ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ	- 0.05 กรัม
- ระยะเวลาในการเขย่า	- 24 ชั่วโมง
- ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิด	- ค่าความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในน้ำประปา

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับชนิดมีโซพอร์สซิลิเกตและดัดแปรพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ หมู่อะมิโน หมู่อัลคิลและหมู่เมอร์แคปโต ด้วยเทคนิคการคอนเดนเซชันร่วม (Co-condensation) ได้แก่ตัวกลาง A-HMS และ M-HMS และการต่อติดภายหลังกระบวนการสังเคราะห์ (Post-synthesis grafting) ได้แก่ตัวกลาง OD-HMS รวมถึงการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแบบสองหมู่ ได้แก่หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโตบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตด้วยเทคนิคการคอนเดนเซชันร่วม

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตัวกลางดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน
HMS	ซิลานอล (SiOH)
A-HMS	อะมิโน (-NH ₂) และซิลานอล (SiOH)
OD-HMS	ออกทิล (-C ₈ H ₁₇) และซิลานอล (SiOH)
M-HMS	เมอร์แคปโต (-SH) และซิลานอล (SiOH)
A5M5-HMS	อะมิโน (-NH ₂) เมอร์แคปโต (-SH) และซิลานอล (SiOH)
PAC	คาร์บอนิล (C=O) ฟีนิล (-C ₆ H ₅) และอื่นๆ

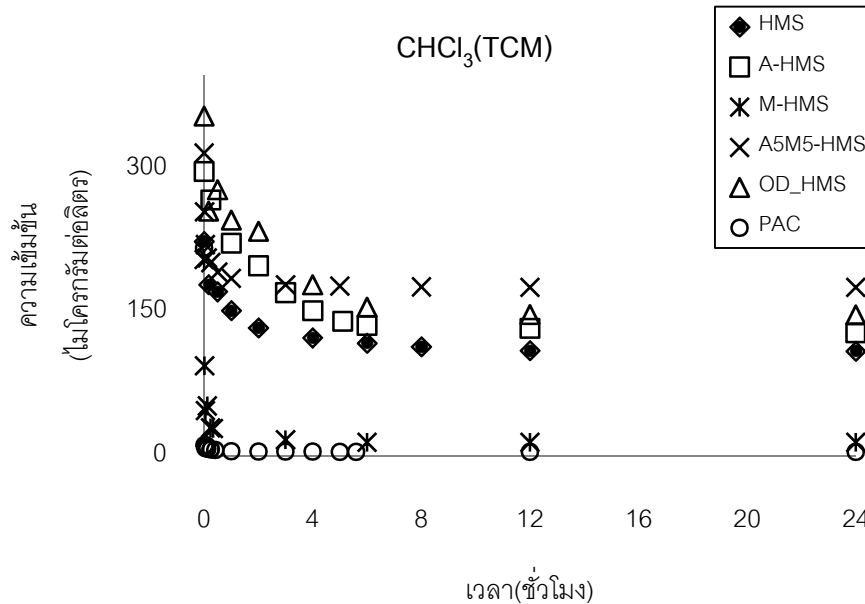
การศึกษาสมบัติการกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ สามารถสรุปสมบัติทางกายภาพและเคมีได้ดังตารางที่ 2.11

4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ ในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

4.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ ในการดูดซับคลอโรฟอร์ม

จากการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มโดยตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด แสดงดังภาพที่ 4.1 โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร แลอุณหภูมิ 25±2^oc ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับได้แก่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง พบว่าการดูดซับคลอโรฟอร์มโดย PAC, M-HMS และ A5M5-HMS เข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ส่วน

ตัวกลางดูดซับ ชนิด OD-HMS, HMS และ A-HMS เข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลาจนถึง 7 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการดูดซับ



ภาพที่ 4.1 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับคลอโรฟอร์มของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^\circ\text{C}$

การวิเคราะห์อัตราเร็วในการดูดซับโดยเลือกใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order model) อธิบายถึงอัตราเร็วของการดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังสมการ

1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

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

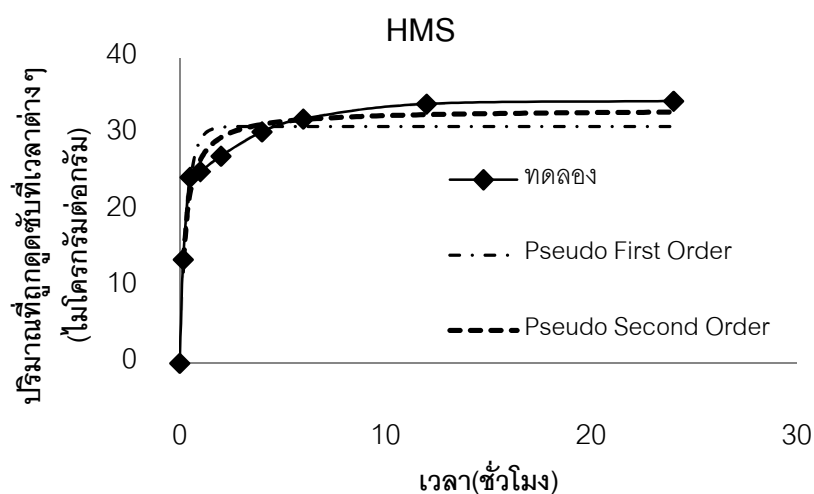
- เมื่อ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)
 q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมดุล (ไมโครกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

2) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

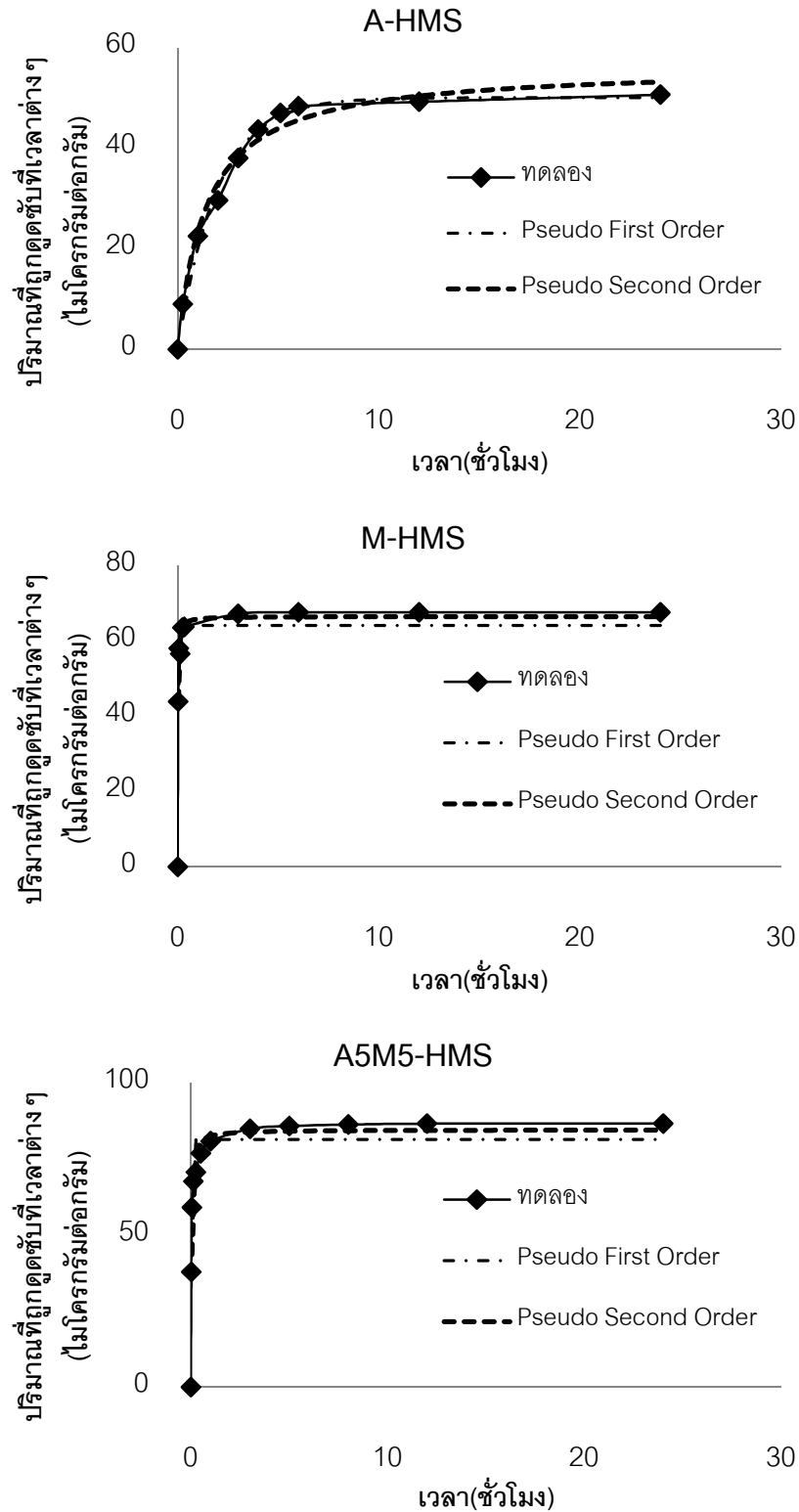
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

- เมื่อ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)
 q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมดุล (ไมโครกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

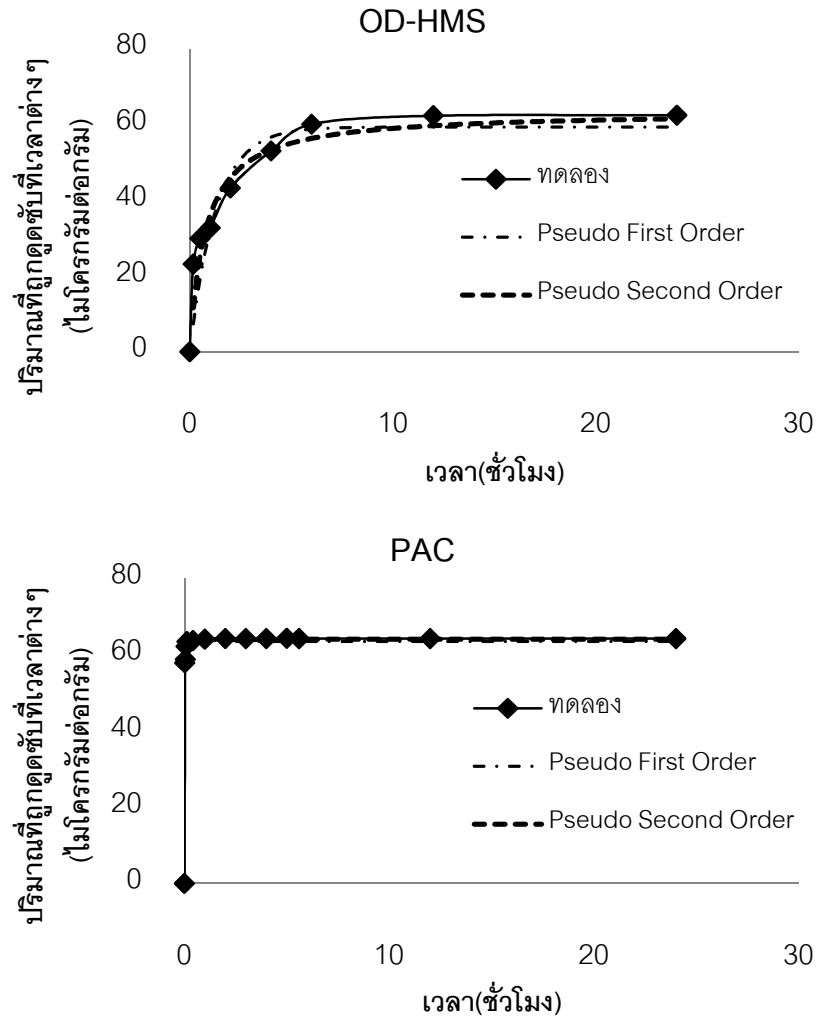
จลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มโดยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือนโดยใช้ความสัมพันธ์เชิง nonlinear โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป OriginPro 8 แสดงดังภาพที่ 4.2 และค่าตัวแปรต่างๆ ทางจลนพลศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าตัวกลางดูดซับมีไซพออร์วูลิตีเกิดชนิดต่างๆ รวมถึง PAC มีอัตราเร็วในการดูดซับสอดคล้องกับสมการอันดับสองเสมือน (pseudo-second-order) ซึ่งพิจารณาจากค่า R^2 ที่เข้าใกล้หนึ่งมากที่สุด โดย PAC มีอัตราการดูดซับเริ่มต้น (h) เร็วที่สุดตามด้วย M-HMS, A5M5-HMS, OD-HMS, A-HMS และ HMS ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของคลอโรฟอร์มเท่ากับ 218.87, 206.61, 318.12, 356.81, 298.83 และ 225.59 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยปริมาณของคลอโรฟอร์มที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง



ภาพที่ 4.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มโดยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือน



ภาพที่ 4.2(ต่อ) จลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอไรฟอร์มโดยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือน



ภาพที่ 4.2(ต่อ) จลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มโดยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือน

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การดูดซับของคลอโรฟอร์มด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวกลางดูดซับ	Pseudo First Order			Pseudo Second Order					
	R^2	k_1 (h^{-1})	q_e (คำนวณ) ($\mu g/g$)	R^2	k_2 ($g/\mu g \cdot h$)	q_e (ทดลอง) ($\mu g/g$)	q_e (คำนวณ) ($\mu g/g$)	h ($\mu g/g \cdot h$)	$t^{0.5}$ (h)
HMS	0.800	2.86	31.05	0.936	0.021	34.35	33.25	23.21	1.43
A-HMS	0.983	0.512	50.06	0.971	0.013	50.67	56.34	41.26	1.36
M-HMS	0.759	53.69	64.56	0.919	1.444	67.47	66.63	6410	0.01
A5M5-HMS	0.824	25.93	81.45	0.960	0.459	86.71	84.59	3,284	0.03
OD-HMS	0.754	58.63	59.37	0.883	0.025	62.48	63.17	99.76	0.63
PAC	0.497	117.37	63.49	0.879	6.112	64.50	64.08	25,097	$2.5e^{-3}$

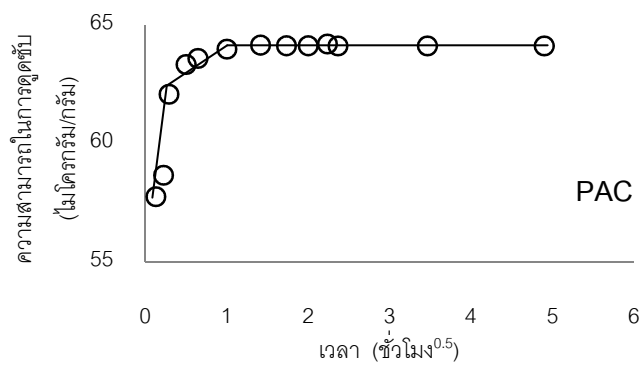
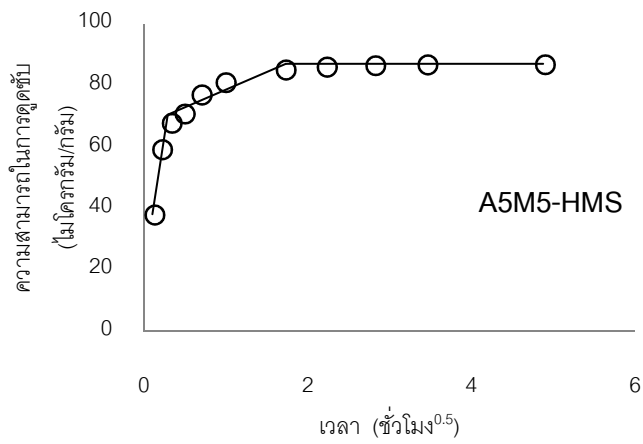
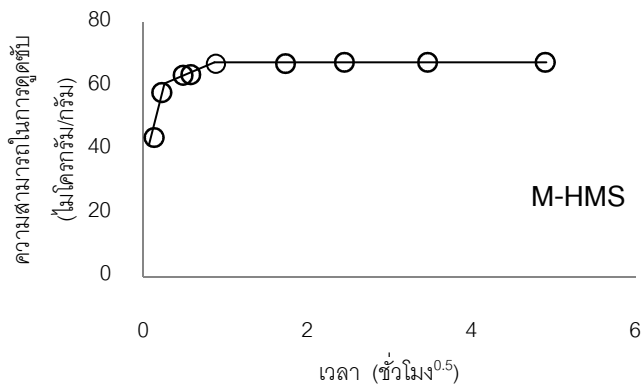
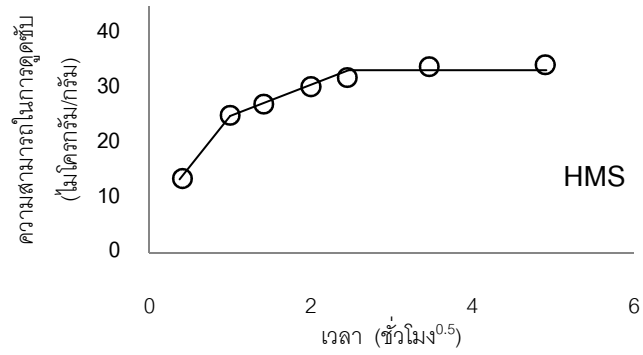
4.2.1 การศึกษากลไกการดูดซับคลอโรฟอร์ม

การศึกษากลไกการดูดซับคลอโรฟอร์มโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคตั้งสมการ

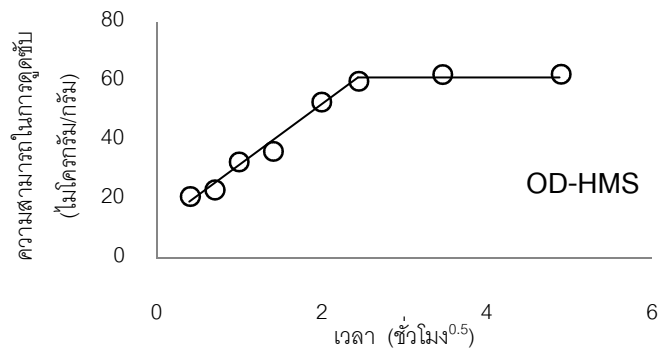
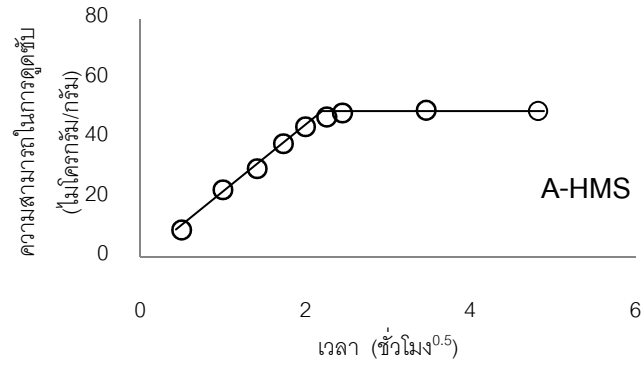
$$q_t = k_p t^{0.5} + C$$

โดย k_p คือค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาค ($\mu\text{g g}^{-1} \cdot \text{hr}^{-0.5}$)

ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.3 กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างคลอโรฟอร์ม กับตัวกลางดูดซับชนิด HMS, M-HMS, A5M5-HMS และ PAC มี 3 ขั้นตอนประกอบด้วยขั้นที่หนึ่งเป็นขั้นตอนการแพร่ผ่านของคลอโรฟอร์มเข้าสู่ชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวกลางดูดซับแสดงให้เห็นเป็นความชันที่แรก ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับอัตราการดูดซับในขั้นที่สองแสดงให้เห็นเป็นความชันที่สอง ซึ่งขั้นตอนที่สองเป็นการแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ และขั้นตอนที่สามเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของคลอโรฟอร์มดูดที่ผิวของตัวกลางดูดซับดูดซับซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วมากจึงไม่เกิดความชันที่เปลี่ยนแปลงจึงเป็นที่ชัดเจนว่าการแพร่ของคลอโรฟอร์มเข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับทั้ง 4 เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาคแสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า $k_p 1$ มากกว่า $k_p 2$ สำหรับตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS และ OD-HMS ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นเพียง 2 ขั้นตอน เนื่องจากตัวกลาง A-HMS เป็นพื้นผิวที่มีความชอบน้ำสูงชั้นของเหลวบนพื้นผิวจึงหนาทำให้การแพร่เข้าสู่ชั้นของของเหลวเกิดขึ้นช้ามาก เมื่อเกิดการแพร่ภายในรูพรุนซึ่งเกิดขึ้นเร็วกว่าแต่ถูกจำกัดโดยขั้นตอนแรกจึงไม่เกิดความชันที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสำหรับตัวกลาง A-HMS นั้นการแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ ส่วนในกรณีของ OD-HMS มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสูงชั้นของเหลวบนพื้นผิวจึงบาง การแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มจึงเกิดขึ้นเร็วทำให้เห็นเพียงความชันของขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าขั้นตอนการแพร่เข้าสู่รูพรุนเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับสำหรับตัวกลาง OD-HMS



ภาพที่ 4.3 กลไกการดูดซับคลอโรฟอร์มโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค



ภาพที่ 4.3(ต่อ) กลไกการดูดซับคลอโรฟอร์มโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่กลไกการดูดซับคลอโรฟอร์มโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค

ตัวกลางดูดซับ	Region 1		Region 2	
	k_{ip1}	C	k_{ip2}	C
HMS	19.49	5.63	10.17	11.87
M-HMS	149.6	24.50	17.03	54.36
A5M5-HMS	137.5	23.05	20.66	60.84
PAC	15.54	56.03	2.47	61.75
A-HMS	20.60	0.622	-	-
OD-HMS	20.10	10.96	-	-

4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ด้วยตัวกลางมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับของ PAC โดยจากการศึกษาสมบัติของ

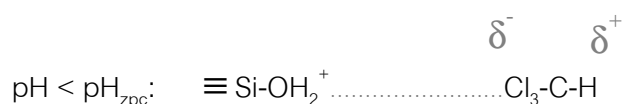
ตัวกลางดูดซับ หมู่ฟังก์ชันก็ต่างๆ บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 4.4 และประกอบกับสมบัติของไตรฮาโลมีเทนเป็นสารที่ไม่แตกตัว มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ และจากการคำนวณค่าการกระจายตัวของประจุ (Dipole Charges) บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4.4 คาดว่ากลไกการดูดซับที่อาจเกิดขึ้นระหว่างมลสารกับตัวกลางดูดซับมี 2 แบบ คือ แรงทางประจุไฟฟ้าระหว่างไอออนและคู่ขั้ว (ion-dipole electrostatic force) เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับสามารถแตกตัว(+/-) ที่ค่าพีเอชต่างกัน ทำให้สามารถเกิดแรงระหว่างไอออนนั้นกับประจุตรงข้าม (Dipole Charges) ที่อยู่ในโมเลกุลของมลสารได้แสดงตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.4 และอีกกลไกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นคือ แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของมลสารและตัวกลางดูดซับบางชนิด

ตารางที่ 4.4 ค่าการกระจายตัวของประจุ (Dipole Charges) ในโมเลกุลของไตรฮาโลมีเทน

Molecular structure	Charges ^a							
	CHCl ₃ (Chloroform)		CHBrCl ₂ (BDCM)		CHBr ₂ Cl (DBCM)		CHBr ₃ (Bromoform)	
	C(1)	-0.11393	C(1)	-0.21659	C(1)	-0.33013	C(1)	-0.45580
	Cl(2)	-0.04220	Br(2)	+0.04915	Br(2)	+0.05880	Br(2)	+0.06725
	Cl(3)	-0.04224	Cl(3)	-0.03862	Cl(3)	-0.03639	Br(3)	+0.06725
	Cl(4)	-0.04233	Cl(4)	-0.03862	Br(4)	+0.05880	Br(4)	+0.06720
	H(5)	+0.24071	H(5)	+0.24468	H(5)	+0.24893	H(5)	+0.25410

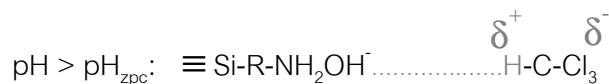
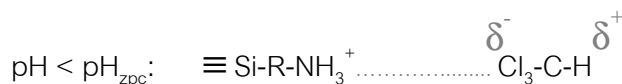
^a คำนวณโดย ChemOffice Ultra 2005

HMS:

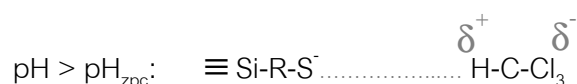
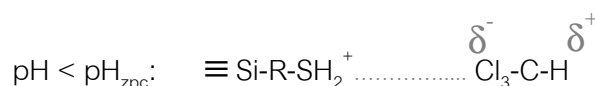


ภาพที่ 4.4 แสดงภาพจำลองการเกิดแรงระหว่างไอออนกับประจุตรงข้ามที่อยู่ในโมเลกุลของมลสาร

A-HMS:



M-HMS:



ภาพที่ 4.4(ต่อ) แสดงภาพจำลองการเกิดแรงระหว่างไอออนกับประจุตรงข้ามที่อยู่ในโมเลกุลของ
มลสาร

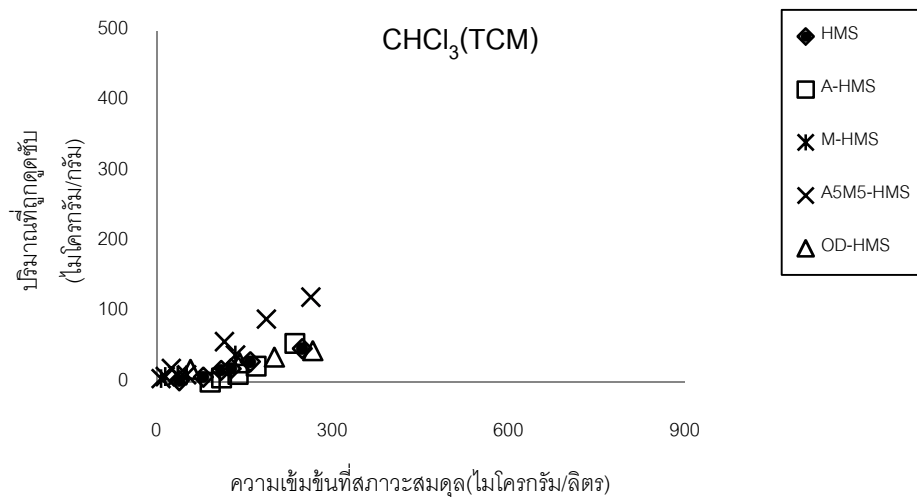
4.3.1 ผลของหมู่ฟังก์ชันต่อความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดแบบเดี่ยว โดยควบคุมพีเอช เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^\circ\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพ ที่ 4.5 พบว่า การดูดซับ TCM บน ตัวกลางมีไซพอร์สซิลิเกตชนิด A5M5-HMS ดูซับได้ดีที่สุด ตาม ด้วย M-HMS, OD-HMS และ A-HMS ตามลำดับ ส่วนผลการดูดซับ BDCM ของตัวกลางมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก ในส่วนของการดูดซับ DBCM และ TBM นั้น พบว่าตัวกลาง M-HMS ให้ผลการดูดซับสูงที่สุดเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ กับ PAC พบว่า PAC ให้ผลการดูดซับที่สูงกว่า

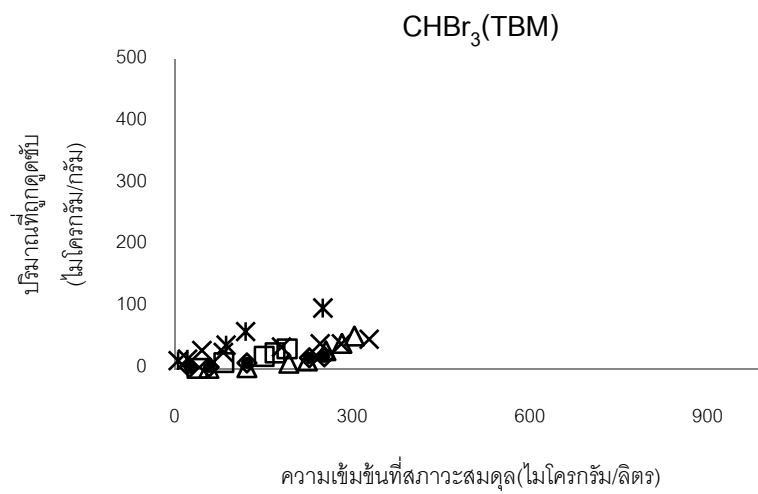
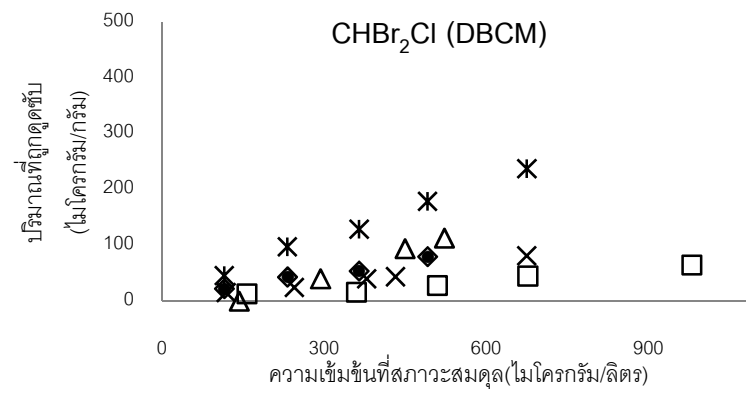
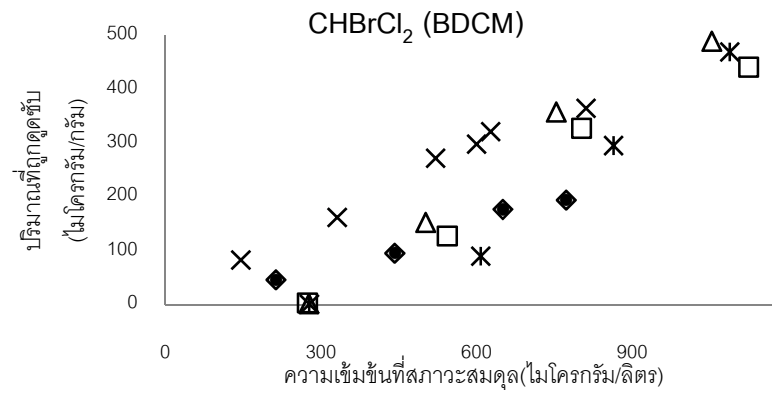
จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า ตัวกลาง M-HMS สามารถดูดซับ DBCM และ TBM ได้มากที่สุด อาจเนื่องจากที่พีเอชเท่ากับ 7 ตัวกลางดูดซับ M-HMS ซึ่งมีค่า pH_{zpc} เท่ากับ 6.2 เกิดการแตกตัวเป็นประจุลบ(-) จึงอาจทำให้เกิดอันตรกิริยากับมลสารที่บริเวณที่มีการกระจายตัวของประจุบวก(+)มากในโมเลกุลของมลสารด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า ซึ่ง DBCM และ TBM จะมีความเป็นบวก(+)มากกว่า DBCM และ TCM จากการคำนวณค่าการกระจายตัวของประจุ(ตารางที่ 4.6) กรณีนี้จึงกล่าวได้ว่าประจุบนพื้นผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ

นอกจากนี้สมบัติความไม่ชอบน้ำสูงของ M-HMS จากค่า Water contact angle (θ) แสดงในตารางที่ 2.11 อาจมีส่วนในการส่งเสริมการดูดซับด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ ซึ่ง TBM และ DBCM มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงกว่า BDCM และ TCM จึงสรุปได้ว่ากระบวนการดูดซับของ M-HMS เกิดจากการเสริมกันระหว่างแรงทางประจุไฟฟ้าและความไม่ชอบน้ำ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับกับ PAC แล้ว (ภาพที่ 4.6) PAC มีประสิทธิภาพการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดได้ดีที่สุด เนื่องจากความซับซ้อนของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและพื้นผิวจำเพาะของ PAC มีมากกว่าตัวกลางมีโซพอร์สซิลิเกต

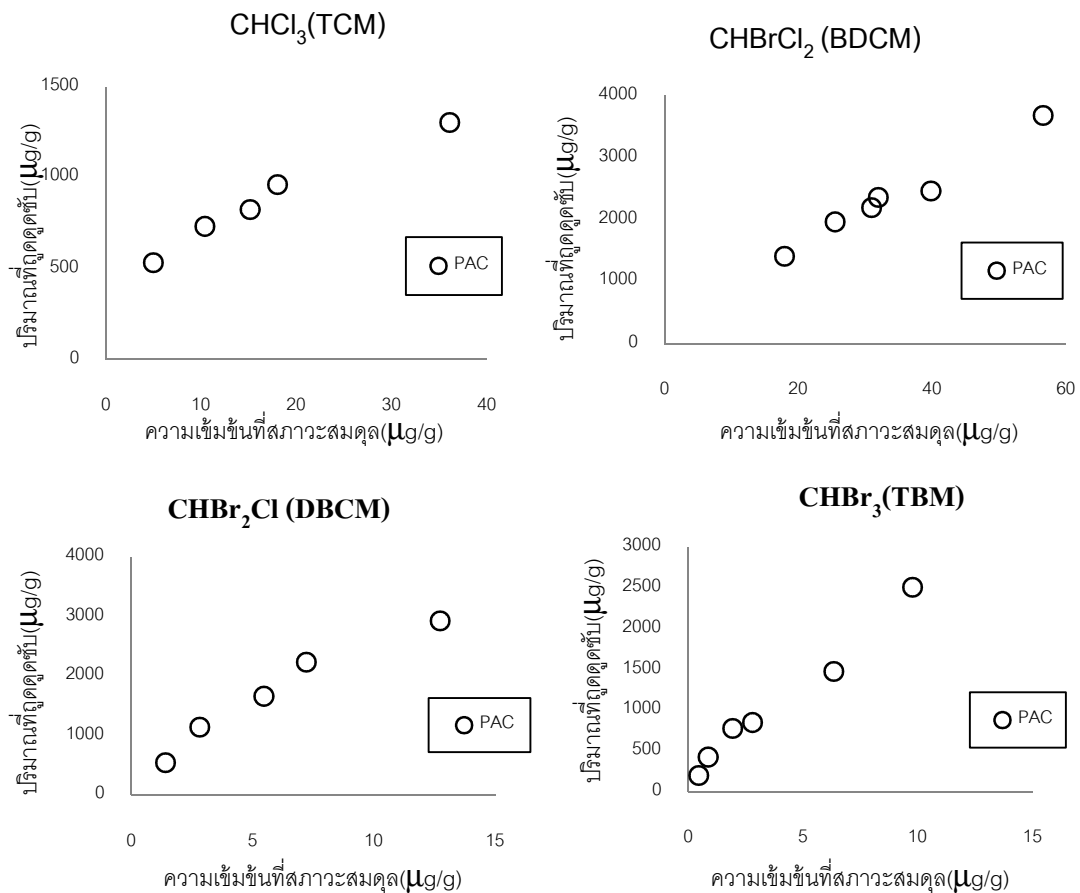
จากผลการทดลองผลของหมู่ฟังก์ชันต่อความสามารถในการดูดซับ แสดงให้เห็นว่า การต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตนั้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน โดยเฉพาะการต่อติดด้วยหมู่เมอร์แคปโต (M-HMS) ให้ผลการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดที่ศึกษาสูงกว่ามีโซพอร์สซิลิเกตที่ไม่ต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (HMS) โดยการต่อติดหมู่เมอร์แคปโต นอกจากจะเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำให้กับ M-HMS แล้ว ยังทำให้พื้นผิวจำเพาะของ M-HMS มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมการดูดซับไตรฮาโลมีเทนด้วย



ภาพที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ของตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.5(ต่อ) ความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ของตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ของตัวกลางดูดซับ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง

4.3.2 ผลของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนต่อความสามารถในการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไตรฮาโลมีเทน เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของตัวกลางมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และ PAC โดยพิจารณาจากความแตกต่างของโครงสร้าง ของไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด แสดงผลดังภาพที่ 4.7

จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนชนิดต่างๆ พบว่า ความสามารถในการดูดซับอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องทำให้ความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนของมีโซพอร์สซิลิเกตแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อ

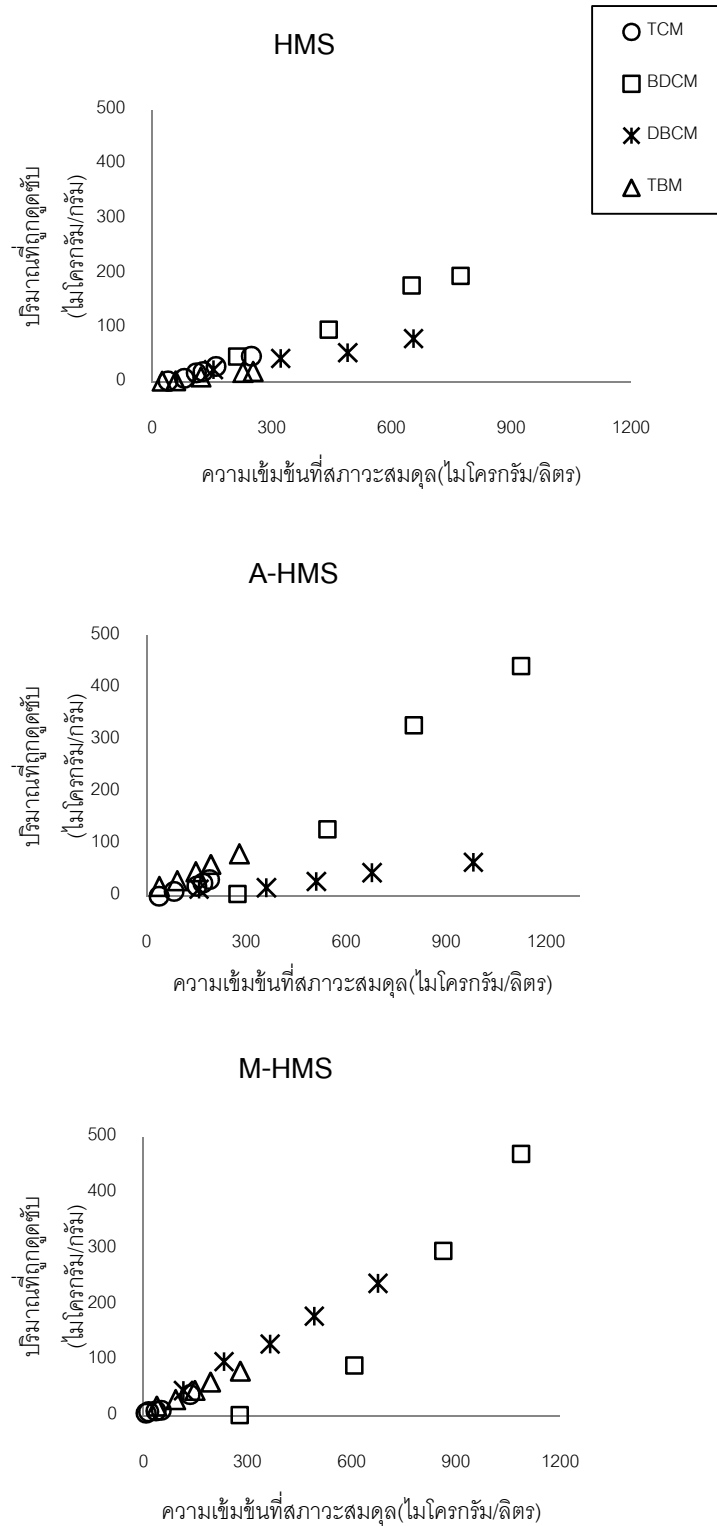
ความสามารถในการดูดซับคือความแตกต่างของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทน ทั้ง 4 ชนิด และจำนวนอะตอมของฮาโลเจนในโมเลกุลไม่เท่ากัน จึงนำไปสู่การศึกษาผลของความแตกต่างของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทน จากการทดลองพบว่า HMS และ OD-HMS สามารถดูดซับ BDCM ดีที่สุด รองลงมาคือ TCM, DBCM และ TBM ตามลำดับ ตัวกลาง A-HMS และ A5M5-HMS สามารถดูด BDCM ดีที่สุดเช่นเดียวกัน ส่วน M-HMS และ PAC สามารถดูด DBCM และ TBM ดีที่สุด ตามด้วย TCM และ BDCM ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า M-HMS และ PAC สามารถดูด BDCM ได้มากกว่า BDCM นอกจากนั้นยังสามารถดูด TBM ได้มากกว่า TCM ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวชี้บ่งว่า โบรโมอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างส่งผลกระทบต่อความสามารถดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำสำหรับ OD-HMS กลับพบว่า ปริมาณของไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นสมดุล 200ppb อาจเป็นเพราะ ความไม่ชอบน้ำของมลสารทั้ง 4 ไม่แตกต่างกันมากนักจึงทำให้เกิดแรงวานเดอร์วาลส์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนกับหมู่ออกทิล (Octyl group) ไม่แตกต่างกันมาก

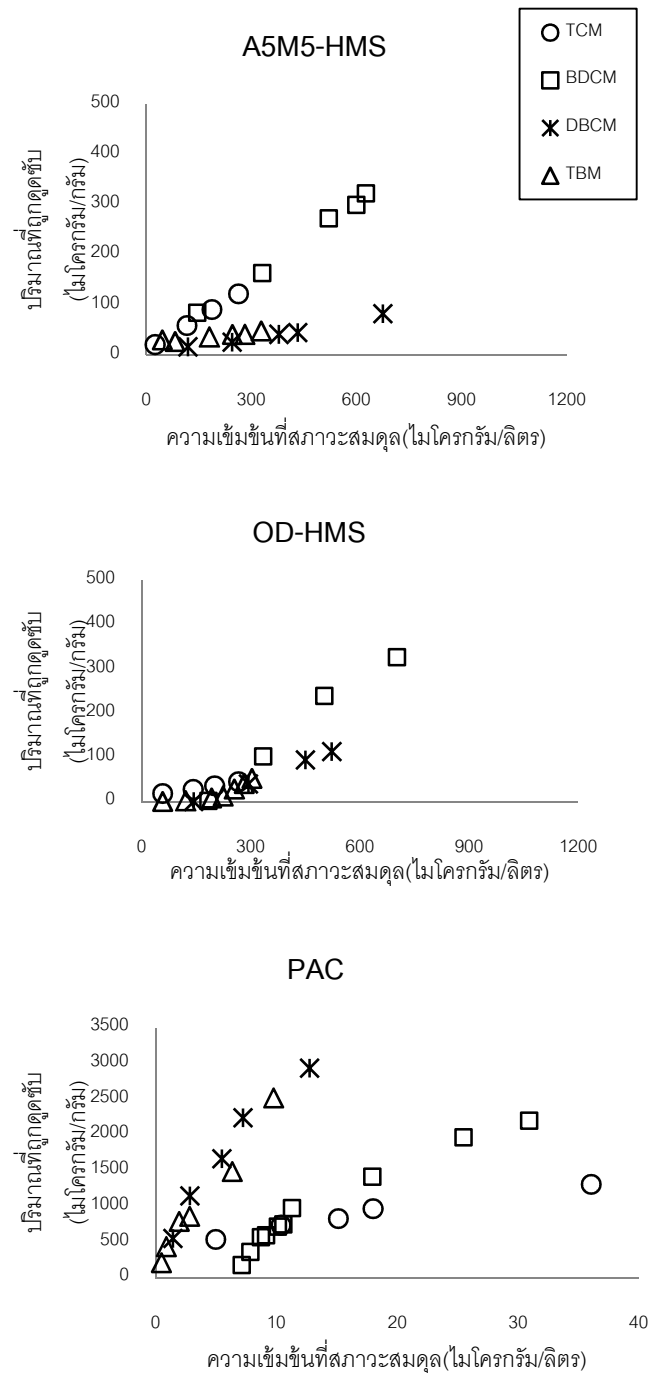
สำหรับผลกระทบของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนต่อตัวกลางที่ชอบน้ำ ซึ่งได้แก่ HMS, A-HMS, A5M5-HMS พบว่าการดูดซับ BDCM และ TCM มีแนวโน้มในการดูดซับมากกว่า DBCM และ TBM อาจเป็นเพราะ BDCM และ TCM มีความชอบน้ำมากกว่า DBCM และ TBM จึงทำให้มีแนวโน้มถูกดูดซับได้ดีบนพื้นผิวของตัวกลางที่ชอบน้ำ หรืออีกนัยหนึ่ง ชนิดและปริมาณของโบรโม และ คลอโรอะตอมซึ่งมีผลต่อความชอบน้ำของไตรฮาโลมีเทน กล่าวคือ การมีโบรโมอะตอมอยู่ในโมเลกุลมากกว่าส่งผลให้มลสารมีสมบัติไม่ชอบน้ำสูงกว่าการมีคลอโรอะตอมอยู่ในโมเลกุลมากกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนมีผลต่อสมบัติการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ

เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของไอโซเทอร์ม 3 แบบ คือ สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ ฟรุนด์ลิช โดยแสดงค่าคงที่ดังตารางที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมแบบเส้นตรงมากที่สุด ถึงแม้ค่า R^2 ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ ฟรุนด์ลิช จะเข้าใกล้ 1 มากแต่ไม่สามารถนำสมการทั้ง 2 นี้มาอธิบายการดูดซับได้ เนื่องจากทำการทดลองที่ความเข้มข้นต่ำ ทำให้ไอโซเทอมยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการเส้นตรงมาอธิบายผลการดูดซับในการทดลองนี้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะเห็นว่าค่า c (จุดตัดแกน y) เกิดขึ้น 2 กรณีคือ ค่า c เป็นบวกและค่า c เป็นลบ อธิบายได้ว่า ในกรณีค่า c เป็นบวกแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็วและรุนแรงภายใต้ความเข้มข้นต่ำซึ่ง

สอดคล้องกับรูปร่างไอโซเทอร์มในกลุ่ม H (Parfitt et al.,1983) ส่วนกรณีค่า c เป็นลบ น่าจะเกิดจากแรงในการดูดซับมีอันตรกิริยาค่อนข้างอ่อนแอ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำที่ความเข้มข้นต่ำ จะสามารถเกิดอันตรกิริยากันได้เมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้น



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนต่อความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.7(ต่อ) เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนต่อความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของไตรฮาโลมีเทน ด้วยตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกต และ PAC

ตัวกลางดูดซับ	Liner			Langmuir			Freudlich			
	มลสาร	k_p	C	R^2	q_m	b	R^2	K_f	1/n	R^2
HMS										
CHCl_3 (TCM)	0.226	-8.032	0.99	-	-	0.981	0.006	1.655	0.984	
CHBrCl_2 (BDCM)	0.279	-15.85	0.979	-	-	0.995	0.105	1.134	0.988	
CHBr_2Cl (DBCM)	0.108	6.519	0.976	250	0.0007	0.992	0.379	0.817	0.984	
CHBr_3 (TCM)	0.076	0.300	0.999	83.33	0.0011	0.999	0.115	0.927	0.999	
A-HMS										
CHCl_3 (TCM)	0.407	-42.44	0.975	-	-	0.961	7.113	2.910	0.997	
CHBrCl_2 (BDCM)	0.601	-178.6	0.983	-	-	0.879	4.04E-07	2.989	0.912	
CHBr_2Cl (DBCM)	0.079	-11.06	0.991	-	-	0.981	0.005	1.386	0.986	
CHBr_3 (TCM)	0.201	-7.262	0.995	-	-	0.914	2.03E-05	2.770	0.928	
M-HMS										
CHCl_3 (TCM)	0.281	5.694	0.952	66.666	0.0117	0.981	1.262	0.729	0.987	
CHBrCl_2 (BDCM)	0.108	3.974	0.984	41.667	0.0078	0.966	0.951	0.608	1.645	
CHBr_2Cl (DBCM)	0.133	11.08	0.997	47.619	0.0068	0.890	2.280	0.550	0.964	
CHBr_3 (TCM)	0.268	6.927	0.994	125	0.0043	0.960	1.049	0.764	0.981	
A5M5-HMS										
CHCl_3 (TCM)	0.428	9.153	0.999	200	0.0045	0.994	1.698	0.758	0.995	
CHBrCl_2 (BDCM)	0.447	24.78	0.979	100000	6.05E-06	0.994	0.964	0.895	0.992	

CHBr ₂ Cl(DBCM)	0.119	-2.824	0.976	200	0.0007	0.970	0.1637	0.934	0.970
CHBr ₃ (TCM)	0.085	19.24	0.999	58.824	0.0098	0.963	4.111	0.416	0.987

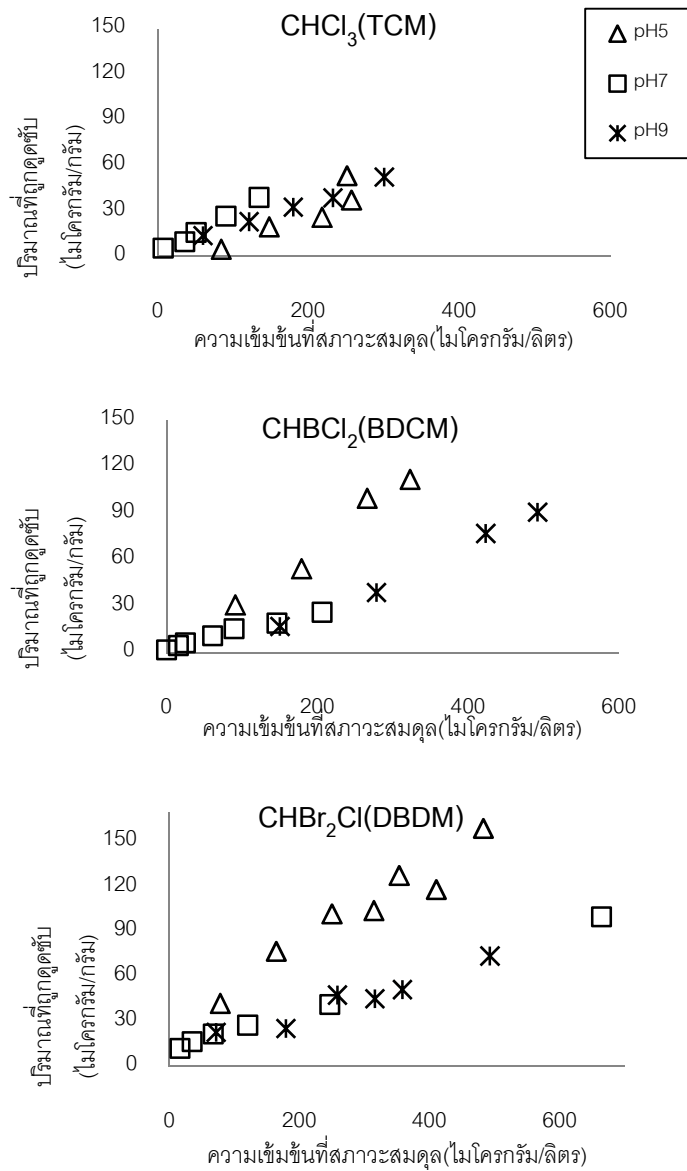
ตารางที่ 4.5(ต่อ) ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของไตรฮาโลมีเทน ด้วยตัวกลางดูดซับมีโซพอร์สซิลิเกตและ PAC

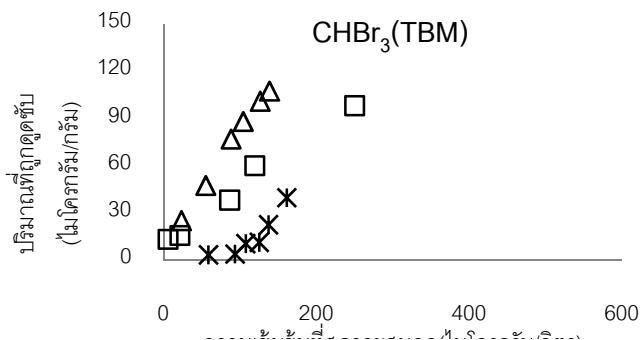
ตัวกลางดูดซับ	Liner			Langmuir			Freudlich			
	มลสาร	k _p	C	R ²	q _m	b	R ²	K _f	1/n	R ²
OD-HMS										
CHCl ₃ (TCM)	0.127	10.5	0.994	58.824	0.0078	0.973	1.8155	0.564	0.973	
CHBrCl ₂ (BDCM)	184	-1116	0.990	-	-	0.834	0.1999	3.544	0.939	
CHBr ₂ Cl(DBCM)	0.304	-45.1	0.996	-	-	0.925	1.48E-11	4.837	0.923	
CHBr ₃ (TCM)	0.204	-21.23	0.795	-	-	0.993	0.0024	2.91	0.95	
PAC										
CHCl ₃ (TCM)	24.09	463	0.976	100000	0.0017	0.955	253.512	0.452	0.991	
CHBrCl ₂ (BDCM)	57.69	441.6	0.995	14285	0.0064	0.996	130.92	0.828	0.996	
CHBr ₂ Cl(DBCM)	205.3	483.9	0.952	100000	0.005	0.991	457.088	0.764	0.978	
CHBr ₃ (TCM)	238	200.3	0.992	100000	0.005	0.987	417.8303	0.791	0.985	

4.3.3 ผลของพีเอช

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด โดยทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9 ด้วยตัวกลางดูดซับ M-HMS แสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่าการดูดซับ BDCM, DBCM และ TBM จะถูกดูดซับได้ดีที่พีเอช 5 เนื่องจากที่พีเอช 5 พื้นผิวของ M-HMS แตกตัวเป็นบวก(+) และการมีธาตุฮาโลเจนอยู่ในโมเลกุลของสารนั้นจะทำให้ค่าประจุลบ (-) ของอะตอม C(1) สูงขึ้น (ตารางที่ 4.4) จึงเพิ่มความแรงของแรงอิออน-ไดโพลระหว่าง $\equiv \text{Si-R-SH}_2^+$ กับอะตอม C(1) ทำให้ตัวกลาง M-HMS สามารถดูดซับได้มากขึ้น แต่ใน

กรณี TCM กลับพบว่าที่พีเอช 7 M-HMS มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าที่พีเอช 5 และ 9 ซึ่งไม่สามารถสรุปกลไกการดูดซับในกรณีได้แน่ชัด ซึ่งค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของ ไตรฮาโลมีเทน ด้วยตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5, 7 และ 9 แสดงดังตารางที่ 4.6





ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ TCM ของตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไตรฮาโลมีเทน ด้วยตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5, 7 และ 9

ตัวกลาง มลสาร	Liner isotherm								
	pH 5			pH 7			pH 9		
	k_p	C	R^2	k_p	C	R^2	k_p	C	R^2
M-HMS									
CHCl_3 (TCM)	0.174	-9.120	0.962	0.281	5.694	0.952	0.157	3.900	0.994
CHBrCl_2 (BDCM)	0.371	-5.813	0.976	0.108	3.974	0.984	0.221	-18.65	0.992
CHBr_2Cl (DBCM)	0.257	28.76	0.934	0.133	11.08	0.997	0.123	9.913	0.928
CHBr_3 (TCM)	0.733	8.396	0.993	0.268	6.927	0.994	0.234	-11.96	0.921

4.4 การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

การศึกษาศักยภาพการคัดเลือกในการดูดซับ โดยใช้สารละลายผสมของไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด (THM4) ดูดซับด้วยตัวกลางชนิดต่างๆ โดยจะทำการศึกษาใน 2 กรณีคือ ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น และในน้ำประปาจริง

4.4.1 กรณีใช้น้ำกลั่นโดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

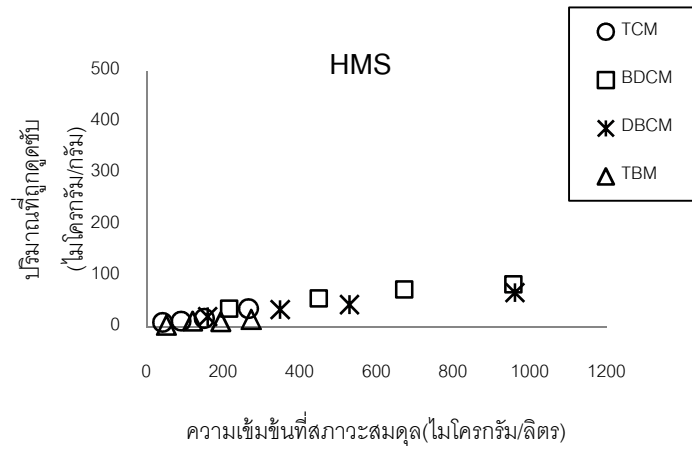
ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.9 และค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงดังตารางที่ 4.8 พบว่าตัวกลาง HMS, A-HMS และ OD-HMS ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันคือสามารถดูด TCM และ BDCM มากที่สุดตามลำดับ รองลงมาคือ DBCM และ TBM ตามลำดับ

ส่วน M-HMS และ PAC ให้ผลการทดลองไปในทางเดียวกันคือ สามารถดูด DBCM และ TBM สูงที่สุดตามลำดับ รองลงมาคือ BDCM และ TCM ตามลำดับ

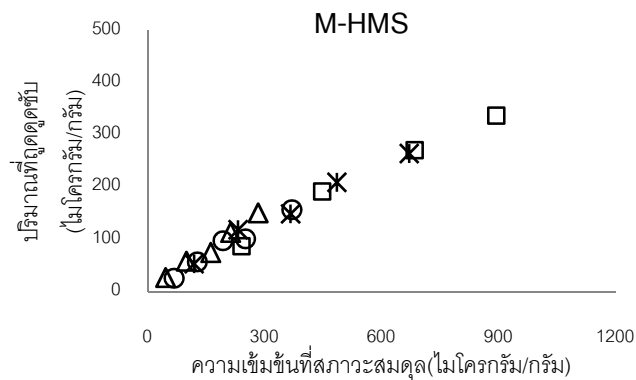
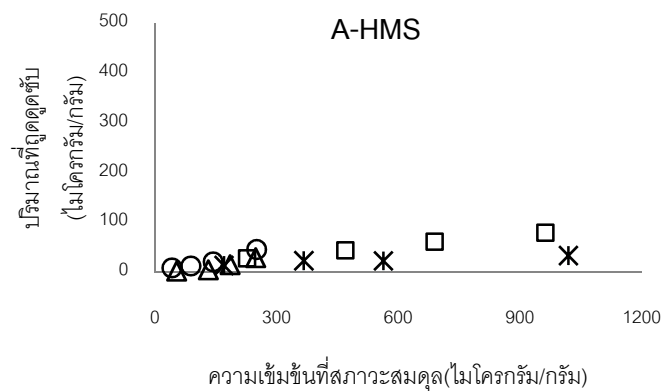
จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับไตรฮาโลมีเทน ทั้ง 4 ชนิดแบบผสม (THM₄) กับไตรฮาโลมีเทนแบบเดี่ยวซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่าปริมาณการดูดซับ (qe) ของ THM₄ บนพื้นผิวของ HMS, A-HMS และ OD-HMS ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบเดี่ยว แสดงให้เห็นว่า THM₄ เกิดการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับ ทำให้ความสามารถของตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิดลดลง ในขณะที่ปริมาณการดูดซับ (qe) ของ THM₄ บนพื้นผิวของตัวกลาง M-HMS และ PAC มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองแบบเดี่ยว อาจเป็นเพราะหมู่เมอร์แคปโต และหมู่ฟังก์ชัน บนพื้นผิวของ PAC มีความจำเพาะ กับไตรฮาโลมีเทน รวมถึงความเข้มข้นที่ทำการศึกษาค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ M-HMS และ PAC ยังคงมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงอยู่ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับในแบบเดี่ยวและแบบผสมไม่แตกต่างกันมากนัก

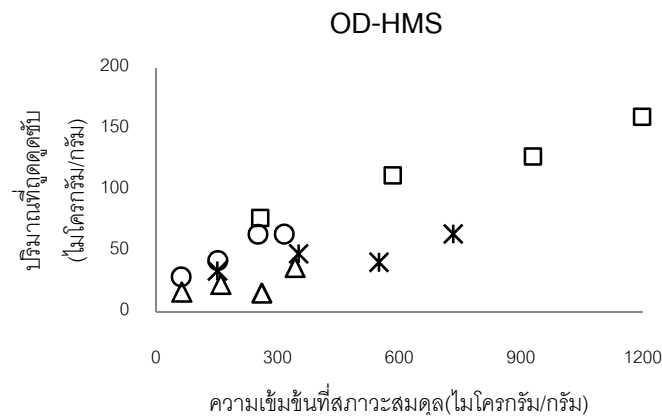
เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการคัดเลือกการดูดซับของตัวกลางดูดซับระหว่างแบบผสมกับแบบเดี่ยว พบว่า ลำดับของความสามารถในการดูดซับ (adsorption order) THM₄ ในแบบผสมมีลำดับเช่นเดียวกันกับในแบบเดี่ยว เว้นแต่ OD-HMS กล่าวคือ DBCM และ TBM ถูกดูดซับได้มากที่สุดบน M-HMS และ PAC ซึ่งสมบัติการคัดเลือกสัมพันธ์กับปริมาณของโบรโมอะตอมของไตรฮาโลมีเทน

เช่นเดียวกับผลการทดลองในแบบเดี่ยว ความสามารถในการดูดซับของ TCM และ BDCM ถูกดูดซับมากที่สุดบนตัวกลาง HMS และ A-HMS สมบัติการคัดเลือกสัมพันธ์กับชนิดและปริมาณโบรโมและคลอโรอะตอม ในโครงสร้างเช่นเดียวกัน ส่วนในกรณีของ OD-HMS พบว่า TCM และ BDCM ถูกดูดซับได้มากกว่า DBCM และ TBM ทั้งๆที่พื้นผิวของ OD-HMS มีความไม่ชอบน้ำสูงเช่นเดียวกับ M-HMS อาจเป็นเพราะปริมาณหมู่ซิลานอลมีมากกว่าหมู่อัลคิล ซึ่งอาจเป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญในการเกิดการดูดซับ

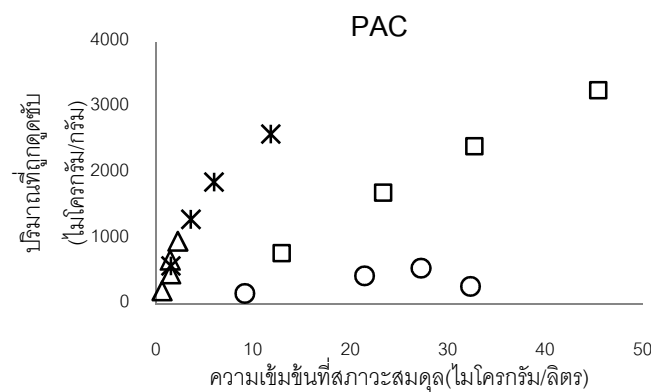


ภาพที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับ THM₄ ในน้ำกลั่น ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±2⁰c เวลา 24 ชั่วโมง





ภาพที่ 4.9(ต่อ) ความสามารถในการดูดซับ THM₄ ในน้ำกลั่น ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±2^oc เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.9(ต่อ) ความสามารถในการดูดซับ THM₄ ในน้ำกลั่น ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±2^oc เวลา 24 ชั่วโมง

4.4.2 กรณีใช้น้ำประปา

ผลการทดลองสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ THM₄ ในน้ำประปาจริง แสดงดังภาพที่ 4.10 และค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงดังตารางที่ 4.8 พบว่าความสามารถในการดูดซับ THM₄ แบบผสมในน้ำประปาเปรียบเทียบกับในน้ำกลั่น ดังภาพที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับและลำดับการดูดซับ THM₄ ในน้ำประปาของ HMS และ OD-HMS ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก จากผลการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไอออน (IS) ในน้ำประปาพบว่าค่า IS

ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ IS ในกรณีน้ำกลั่น (ประมาณ 10 mM) ที่ค่า pH เท่ากับ 7 พบว่า IS ของน้ำประปามีค่าน้อยกว่าประมาณ 2 เท่า (ตารางที่ 4.7) ซึ่งโดยทั่วไป IS ส่งผลกระทบต่อกลไกการดูดซับด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า (electrostatic force) (Bjelopavlic et al., 1999) ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่สมดุล (qe) ลดลง อย่างไรก็ตาม จากผลงานที่เคยมีการศึกษามาก่อน รายงานว่าค่าความเข้มข้นที่สมดุล (qe) ไม่แตกต่างกันมากนักที่ค่า IS ต่ำในช่วง (0-50mM) (Yu et al., 2008) ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า การมีอยู่ของไอออนในน้ำประปาไม่กระทบต่อสมบัติการคัดเลือกของ HMS และ OD-HMS

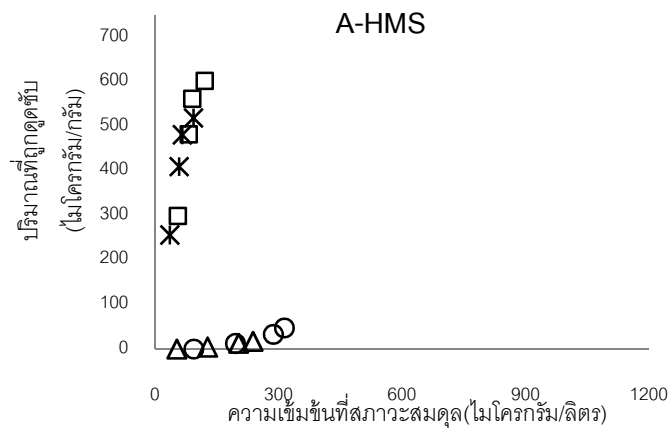
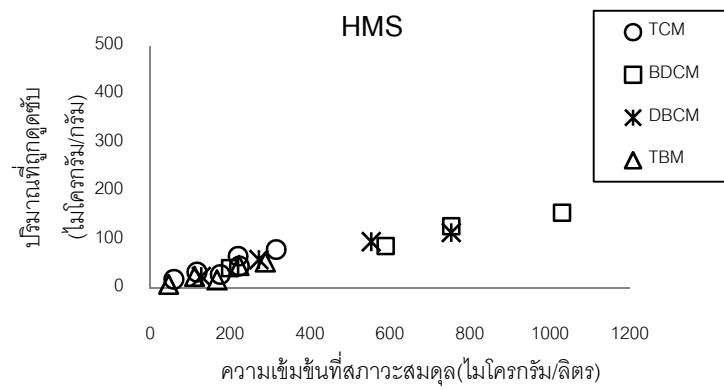
สำหรับ A-HMS นั้นกลับพบว่าความสามารถในการดูดซับ BDCM และ DBCM มีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีของน้ำประปา อาจเนื่องมาจากสัดส่วนของประจุบวก(+) ต่อประจุลบ(-) บนพื้นผิวของ A-HMS ที่ IS = 4.6 mM (ในน้ำประปา) มีมากกว่าในน้ำกลั่นพีเอช7 (IS=10mM) ซึ่งมีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างประจุบวก(+) ของ A-HMS และคู่ขั้วลบที่อะตอม C(1) (high negative dipole) ที่มีอยู่สูงของมลสารทั้งสองมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับ (qe) สูงขึ้น ซึ่งมีผลการศึกษาพบว่าพื้นผิวที่มี pH_{zpc} สูงๆ จะมีสัดส่วนของประจุบวก(+) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ IS = 4.6mM (ในน้ำประปา) เมื่อเทียบกับในน้ำกลั่นพีเอช 7 (IS=10mM) (Prarat ., 2011) แต่ TBM ซึ่งมี negative dipole สูงที่สุดกลับดูดน้อยลง ซึ่งอาจเนื่องมาจาก TBM มีความไม่ชอบน้ำสูง (high hydrophobicity) จึงมีผลต่อการดูดซับของ A-HMS ซึ่งมีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (hydrophilic surface)

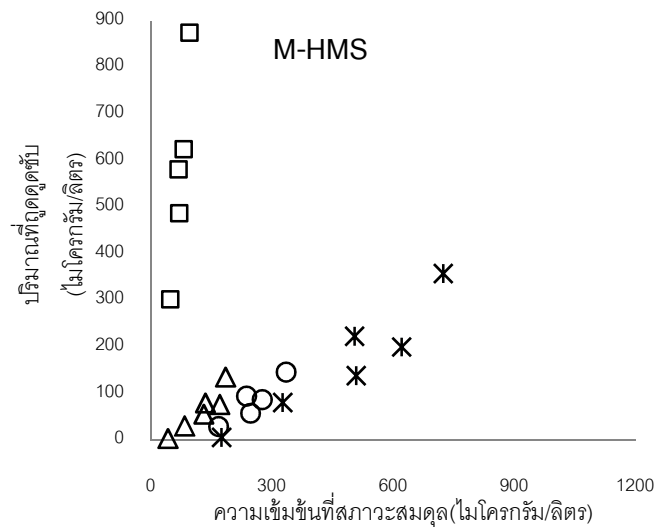
ส่วนในกรณีของ M-HMS พบว่าอันดับการดูดซับในน้ำประปามีลักษณะเช่นเดียวกับในน้ำกลั่นพีเอช 7 ยกเว้นความเข้มข้นที่สมดุล (qe) ของ BDCM กลับสูงกว่า DBCM มาก ซึ่งยังไม่สามารถสรุปกลไกการดูดซับได้ นอกจากนี้พบว่าความสามารถของการดูดซับของ PAC กลับมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในน้ำประปา อาจเป็นไปได้ว่า ความซับซ้อนของหมู่ฟังก์ชันของ PAC เกิดอันตรกิริยากับไอออนในน้ำประปาได้ จึงส่งผลให้ ปริมาณการดูดซับ (qe) THM₄ ลดลง

ตารางที่ 4.7 สมบัติของน้ำประปาและความเข้มข้นของอิเล็คโตรไลต์ในน้ำประปาที่ใช้ในการทดลอง

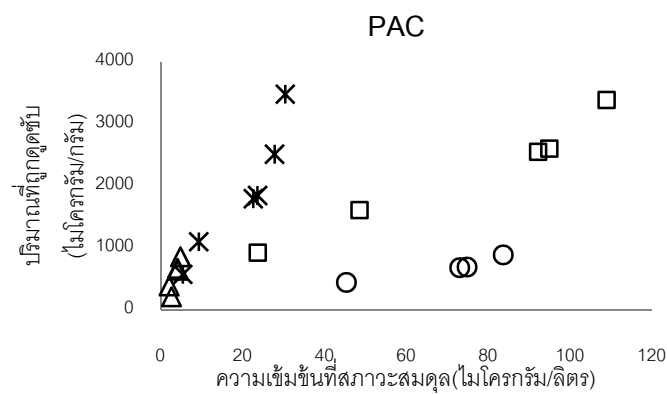
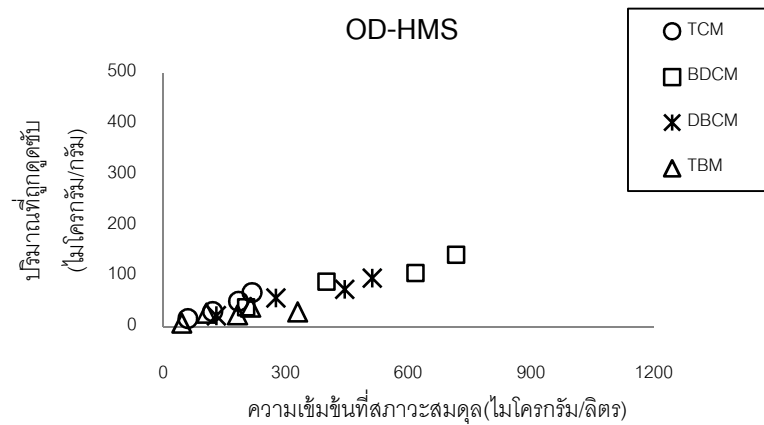
Parameters	น้ำประปา
pH	7.15
Conductivity ^b ($\mu\text{mol cm}^{-1}$)	323
TDS ^b (mg L^{-1})	202

Ionic strength (mM)	4.6									
Electrolytes(mg L ⁻¹)	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Br ⁻	Cl ⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
	23.57	1.34	32.06	1.73	ND	23.31	0.21	1.98	33.38	
Background THMs	TCM		BDCM		DBC		TBM			
(μg L ⁻¹)	45.39		27.42		0.75		ND			





ภาพที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับ THM4 ในน้ำประปาจริง ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}C$ เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.10(ต่อ) ความสามารถในการดูดซับ THM4 ในน้ำประปาจริง ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไตรฮาโลมีเทน โดยเปรียบเทียบสมบัติการคัดเลือกในน้ำกลั่นและในน้ำประปากับแบบเดียว

ตัวกลาง มลสาร	Liner isotherm								
	แบบเดียว			ผสม(ในน้ำกลั่น)			ผสม(ในน้ำประปา)		
	k_p	C	R^2	k_p	C	R^2	k_p	C	R^2
HMS									
$\text{CHCl}_3(\text{TCM})$	0.226	-8.032	0.99	0.123	1.700	0.956	0.239	1.061	0.828
$\text{CHBrCl}_2(\text{BDCM})$	0.279	-15.85	0.979	0.064	25.23	0.962	0.141	12.01	0.978
$\text{CHBr}_2\text{Cl}(\text{DBCM})$	0.108	6.519	0.976	0.057	12.93	0.995	0.141	13.34	0.978
$\text{CHBr}_3(\text{TCM})$	0.076	0.300	0.999	0.051	0.755	0.999	0.191	-2.026	0.847

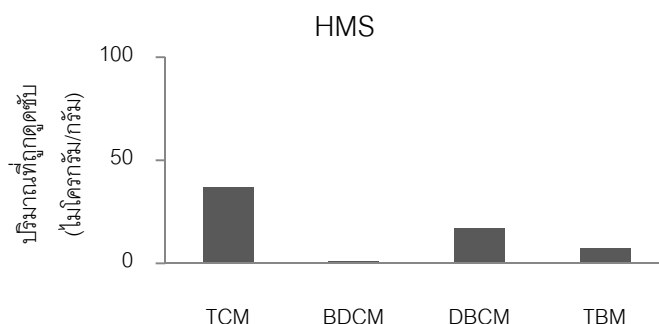
ตารางที่ 4.8(ต่อ) ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไตรฮาโลมีเทน โดยเปรียบเทียบสมบัติการคัดเลือกในน้ำกลั่นและในน้ำประปากับแบบเดียว

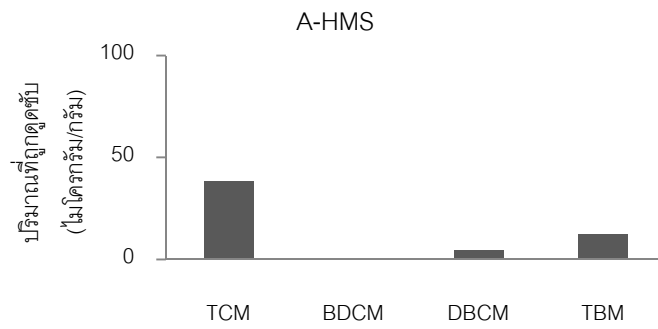
ตัวกลาง มลสาร	Liner isotherm								
	แบบเดียว			ผสม(ในน้ำกลั่น)			ผสม(ในน้ำประปา)		
	k_p	C	R^2	k_p	C	R^2	k_p	C	R^2
A-HMS									
$\text{CHCl}_3(\text{TCM})$	0.407	-42.44	0.975	0.181	-1.722	0.968	0.204	-21.04	9.940
$\text{CHBrCl}_2(\text{BDCM})$	0.601	-178.6	0.983	0.060	17.080	0.977	4.631	87.03	0.860
$\text{CHBr}_2\text{Cl}(\text{DBCM})$	0.079	-11.06	0.991	0.021	12.020	0.917	4.571	129.7	0.870
$\text{CHBr}_3(\text{TCM})$	0.201	-7.262	0.995	0.141	-8.907	0.998	0.093	-4.871	0.964
M-HMS									
$\text{CHCl}_3(\text{TCM})$	0.281	5.694	0.952	0.419	3.348	0.973	0.647	-79.53	0.924
$\text{CHBrCl}_2(\text{BDCM})$	0.108	3.974	0.984	0.336	27.53	0.985	11.45	-258.0	0.944
$\text{CHBr}_2\text{Cl}(\text{DBCM})$	0.133	11.08	0.997	0.374	18.80	0.983	0.577	-107.0	0.882
$\text{CHBr}_3(\text{TCM})$	0.268	6.927	0.994	0.513	2.833	0.983	0.791	-34.85	0.867
OD-HMS									
$\text{CHCl}_3(\text{TCM})$	0.127	10.5	0.994	0.150	20.71	0.945	0.318	-4.580	0.975
$\text{CHBrCl}_2(\text{BDCM})$	184	-1116	0.990	0.083	57.87	0.971	0.181	6.834	0.943
$\text{CHBr}_2\text{Cl}(\text{DBCM})$	0.304	-45.1	0.996	0.042	27.80	0.687	0.179	1.968	0.965

CHBr ₃ (TCM)	0.204	-21.23	0.795	0.073	11.48	0.998	0.071	13.17	0.455
PAC									
CHCl ₃ (TCM)	24.09	463	0.976	10.0	105.400	0.913	10.49	-51.91	0.929
CHBrCl ₂ (BDCM)	57.69	441.6	0.995	76.110	137.200	0.995	26.16	281.1	0.968
CHBr ₂ Cl(DBCM)	205.3	483.9	0.952	186.4	515.300	0.940	93.94	8.570	0.866
CHBr ₃ (TCM)	238	200.3	0.992	464.8	-110.80	0.907	200.3	-167.5	0.827

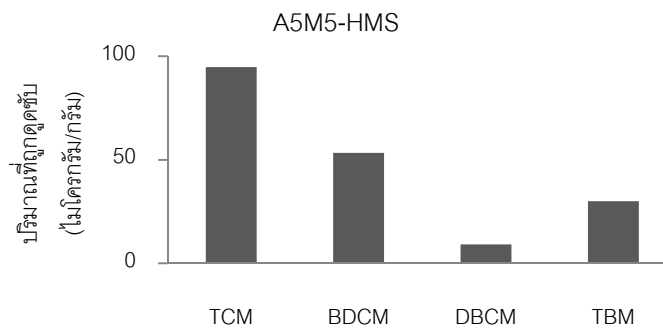
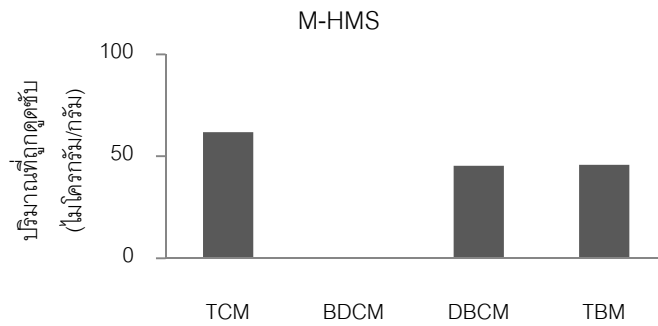
4.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนตามมาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก

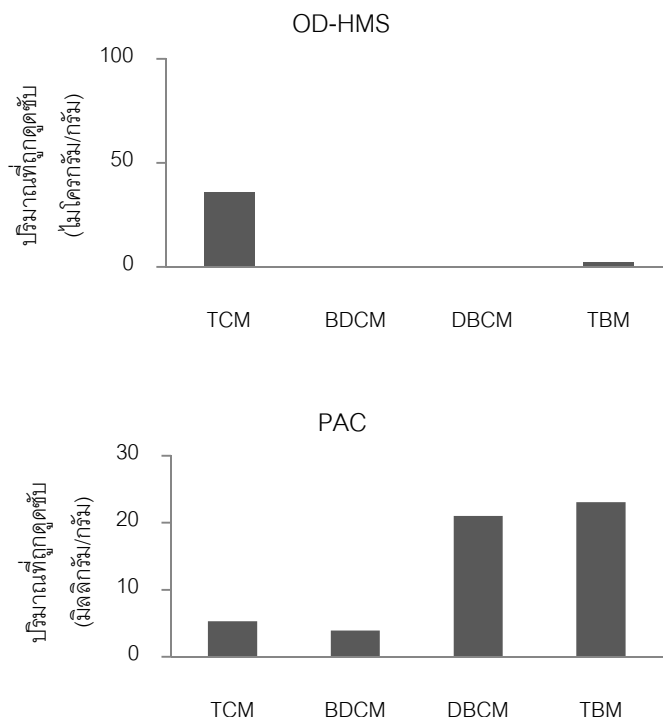
การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดโดยตัวกลางดูดซับมีไซฟอรัสซิลิเกตชนิดต่างๆ และ PAC ซึ่งกำหนดความเข้มข้นที่สมดุลของสารไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดแตกต่างกันตามมาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก (ตารางที่ 2.2)แสดงดังภาพที่ 4.11 จากการจำลองประสิทธิภาพการดูดซับด้วยวิธีดังกล่าว พบว่าตัวกลางดูดซับมีไซฟอรัสซิลิเกต สามารถดูดซับ TCM ได้สูงที่ความเข้มข้นสมดุลที่ 200 ไมโครกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก) ตัวกลางดูดซับ HMS, A-HMS, M-HMS และ OD-HMS สามารถดูด BDCM ได้น้อยมากโดยเฉพาะ A-HMS, M-HMS และ OD-HMS ไม่พบการดูดซับ BDCM ที่ความเข้มข้นสมดุล 60 ไมโครกรัมต่อลิตร(มาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก) และตัวกลางดูดซับ M-HMS สามารถดูดซับ DBCM และ TBM ได้สูงที่ ที่ความเข้มข้นสมดุลที่ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก) รองลงมาจาก TCM ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับ PAC พบว่าสามารถดูดซับTBM และ DBCM ได้สูงที่ความเข้มข้นสมดุล 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก) และสามารถดูดซับTCM และ BDCM ได้น้อยที่ความเข้มข้นสมดุล 200 และ 60 ไมโครกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก) เมื่อเทียบกับ TBM และ DBCM





ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูซ้ำสารประกอบไตรฮาโลมีเทนตามมาตรฐานนำประปาขององค์การอนามัยโลก ของตัวกลางดูซ้ำชนิดต่างๆ





ภาพที่ 4.10(ต่อ) การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบไตรฮาโลมีเทนตามมาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

นอกจากนี้จากการศึกษาปริมาณไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาในเขตกรุงเทพมหานครในปี 2550 พบว่าปริมาณ TCM, BDCM และ DBCM ที่พบในน้ำประปาสูงสุดเท่ากับ 159, 20 และ 5 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วน TBM ไม่พบปริมาณที่ตรวจวัดได้ ซึ่งปริมาณไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่พบนั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก แต่เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพน้ำและเพิ่มความมั่นใจในการบริโภคน้ำประปานั้น อาจมีการนำตัวกลางดูดซับมาใช้เพื่อกำจัดไตรฮาโลมีเทนออกจากน้ำ โดย US Environmental Protection Agency (USEPA, 2010) ได้กำหนดมาตรฐานค่าความเข้มข้นสูงสุด (Maximum contaminant level; MCLs) ของสารไตรฮาโลมีเทนในระยะที่ 1 ไว้ที่ไม่เกิน 80 ไมโครกรัมต่อลิตร และระยะที่ 2 ได้กำหนดค่า MCLG (Maximum contaminant level goal) เท่ากับ 40 ไมโครกรัมต่อลิตร

จากการศึกษาการดูดซับไตรฮาโลมีเทนโดยมีไฮพอร์สซิดิเกตนั้นพบว่าตัวกลางดูดซับ A5M5-HMS สามารถดูดซับไตรฮาโลมีเทนที่ความเข้มข้นสมมูลต่ำได้สูงที่สุด คือที่ความเข้มข้นสมมูล 40 ไมโครกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับ TCM, BDCM, DBCM และ TBM เท่ากับ 26.27, 42.66, 1.936 และ 22.64 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ หากต้องการลดปริมาณไตรฮาโลมีเทนให้

เป็นไปตามค่ามาตรฐาน (MCLG) คิดจากปริมาณที่พบมากที่สุดคือ TCM ซึ่งพบสูงสุด 150 ไมโครกรัมต่อลิตร จะต้องใช้ปริมาณตัวกลางดูดซับ A5M5-HMS เท่ากับ 4,187 กรัมต่อน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร ส่วนกรณี PAC ใช้ประมาณ 77 กรัมต่อน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับเมโซพอร์ซิลิเกต (HMS) และดัดแปรพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแบบเดี่ยว ได้แก่ 3-aminopropyltriethoxy- 3-mercaptopropyl- และ n-octyldimethyl- และแบบคู่ระหว่าง 3-aminopropyltriethoxy- และ 3-mercaptopropyl (A-HMS M-HMS OD-HMS และ A5M5-HMS ตามลำดับ) เพื่อศึกษาผลของการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes: THMs) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์และประสิทธิภาพในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3 , TCM), ไดคลอโรโบรโมมีเทน (CHBrCl_2 , BDCM), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (CHBr_2Cl , DBCM) และไตรโบรโมมีเทน (CHBr_3 , TBM) ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-500 ไมโครกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 7 และค่าความแรงประจุ 0.01 โมลาร์ และทำการศึกษาผลกระทบของโครงสร้างของ THMs ที่แตกต่างกันต่อสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของตัวกลางดูดซับในสารละลายทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม

จากการทดสอบจลนพลศาสตร์ พบว่าอัตราการดูดซับคลอโรฟอร์มใน 1 ถึง 2 ชั่วโมงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลาประมาณ 5 ถึง 7 ชั่วโมง ส่วนการดูดซับโดย PAC จะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในระยะเวลาเพียง 1 ถึง 2 ชั่วโมง ซึ่งอาจเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ PAC นั้นมีความซับซ้อนมากกว่าตัวกลางมีโซพอร์ซิลิเกต

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดแบบเดี่ยว พบว่าตัวกลาง M-HMS สามารถดูดซับ DBCM และ TBM ได้มากที่สุด เนื่องจากที่พีเอชเท่ากับ 7 ตัวกลางดูดซับ M-HMS เกิดการแตกตัวเป็นประจุลบ(-) จึงอาจทำให้เกิดการดูดซับกับมลสารที่บริเวณ H^+ ในโมเลกุลของมลสาร ซึ่ง DBCM และ TBM จะมีความเป็นบวกมากกว่า BDCM และ TCM นอกจากนี้สมบัติความไม่ชอบน้ำสูงของ M-HMS อาจมีส่วนในการส่งเสริมการดูดซับด้วย และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับกับ PAC แล้ว PAC มีประสิทธิภาพการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดดีที่สุด เนื่องจากความซับซ้อนของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ PAC มีมากกว่าตัวกลางมีโซพอร์ซิลิเกต

จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนชนิดต่างๆ พบว่า โบรโมอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างส่งผลกระทบต่อ การดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ ส่วนคลอโรอะตอมในโครงสร้างของไตรฮาโลมีเทนชนิด BDCM และ TCM ส่งผลกระทบต่อ

ของต่อตัวกลางที่ชอบน้ำ เนื่องจากมีความชอบน้ำมากกว่ากลุ่มโบรโมอะตอมจึงทำให้มีแนวโน้ม ถูกดูดซับได้ดีบนพื้นผิวของตัวกลางที่ชอบน้ำ หรืออีกนัยหนึ่ง ชนิดและปริมาณของ โบรโมและคลอโรอะตอมซึ่งมีผลต่อความชอบน้ำของไตรฮาโลมีเทน

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด ด้วยตัวกลางดูดซับ M-HMS พบว่าการดูดซับ BDCM, DBCM และ TBM จะถูกดูดซับได้ดีที่พีเอช 5 เนื่องจากที่พีเอช 5 พื้นผิวของ M-HMS แยกตัวเป็นบวก(+) และการมีธาตุ ฮาโลเจนอยู่ในโมเลกุลของสารนั้นจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกลุ่มหมอกอิเล็คตรอนทำให้คาร์บอน อะตอม (C1) แสดงค่าประจุไปทางลบ (-) สูงกว่าส่วนที่เป็นบวกในโมเลกุลจึงเพิ่มโอกาสในการ เกิดปฏิกิริยากับพื้นผิวของตัวกลาง M-HMS จึงทำให้สามารถดูดซับได้มากขึ้น

การศึกษาศัมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพการดูดซับ THM_4 แบบผสม กับไตรฮาโลมีเทนแบบเดี่ยว พบว่าปริมาณการดูดซับ (qe) ของ THM_4 แบบผสมบนพื้นผิวของ HMS, A-HMS และ OD-HMS ลดลงเล็กน้อยเมื่อ เปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบเดี่ยว แตกต่างจาก M-HMS และ PAC ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับ THM_4 ในแบบเดี่ยวและแบบผสมไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากความเข้มข้นที่ ทำการศึกษาค่อนข้างต่ำซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ M-HMS และ PAC ยังคงมีประสิทธิภาพในการ ดูดซับสูงเพียงพอในการดูดซับ THM_4 ทั้งหมด

ผลการทดลองสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ THM_4 ในน้ำประปาจริง พบว่า การ มีอยู่ของไอออนในน้ำประปาไม่กระทบต่อสมบัติการคัดเลือกของ HMS และ OD-HMS ส่วนใน กรณีของ M-HMS พบว่าอันดับการดูดซับในน้ำประปามีลักษณะเช่นเดียวกับในน้ำกลั่นพีเอช 7 แต่ ความสามารถในการดูดซับ ของ BDCM กลับสูงกว่า DBCM มาก ซึ่งยังไม่สามารถสรุปกลไกการ ดูดซับได้ นอกจากนี้พบว่าความสามารถของการดูดซับของ PAC กลับมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในน้ำประปา อาจเป็นไปได้ว่า ความซับซ้อนของหมู่ฟังก์ชันของ PAC เกิดอันตรกิริยากับไอออนใน น้ำประปาได้ง่ายกว่า THM_4 จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ THM_4 ลดลง

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าจากผลการทดลองพบว่า หมู่ 3- mercaptopropyl- บน HMS (M-HMS) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด อัตราเร็วในการดูดซับของตัวกลางดูดซับชนิดไม่ชอบน้ำมีค่าสูงกว่าตัวกลางดูดซับชนิดชอบน้ำ โครงสร้างของสาร THMs ที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและสมบัติการดูดซับแบบ คัดเลือก ซึ่งสารประกอบกลุ่มโบรโมมีเทน มีแนวโน้มในการถูกดูดซับโดยหมู่ M-HMS ได้ดีกว่า สารประกอบกลุ่มคลอโรมีเทน นอกจากนี้ การมีอยู่ของอิเล็คโตรไลต์ในน้ำประปาไม่ส่งผลต่อ

สมบัติการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับเนื่องจากอิเล็คโตรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับของ PAC กลไกการดูดซับสาร THMs คาดว่าเกิดจากแรงทางประจุไฟฟ้าระหว่างไอออนและคู่ขั้ว (Ion-dipole electrostatic force)

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวกลางดูดซับมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆไปประยุกต์ใช้ควรพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่ม DBPs กลุ่มอื่นๆร่วมด้วย หรืออาจใช้ควบคู่กับถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารอื่นๆ ได้สูง แต่ยังคงดูดซับสารชนิดชอบน้ำได้ต่ำซึ่ง DBPs ส่วนใหญ่มีสมบัติความชอบน้ำสูง เพื่อลดปัญหาการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง อีกทั้งมีไซพอร์สซิลิเกตยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายอาจมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้

นอกจากนี้ควรมีการศึกษาผลของ pH เพิ่มเติม เพื่อยืนยันให้ทราบว่าแรงทางประจุไฟฟ้าแลคู่ขั้วเป็นแรงหลักในการดูดซับไตรฮาโลมีเทนของตัวกลางมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดอื่นๆหรือไม่ นอกจากตัวกลาง M-HMS ที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ แต่ก็ยังไม่สามารถสรุปผลการทดลองได้แน่ชัด จึงควรศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมเพื่อหาข้อสรุปตรงนี้ รวมถึงศึกษาผลที่ทำให้ลำดับการดูดซับของไตรฮาโลมีเทนแบบผสมที่เปลี่ยนแปลงไปจากลำดับการดูดซับแบบเดี่ยว ที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ในบางกรณีนี้ด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- การประสานครหลวง. 2550. ฝ่ายคุณภาพน้ำการประสานครหลวง [Online]. การประสานครหลวง. แหล่งที่มา: <http://www.mwa.co.th/quality.html> [2550, พฤศจิกายน 27]
- ชุติมา กัลยาประสิทธิ์. ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิกาต่อการดูดซับกรดฮาลออะซิติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรพจน์ กนกกันตพงษ์ บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญญาผล สุรพงษ์ วัฒนจิระ และประเสริฐ ภาสันต์ (2549). สารที่มีศักยภาพในการกักเก็บน้ำประปากรุงเทพมหานคร. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 8-10 มีนาคม, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, W. S., Lee, D. H., Kim, T. J., Kim, J. H., Seo, G., and Ryoo, R. 1999. Post-synthetic preparations of titanium-containing mesopore molecular sieves. Applied Catalysis 181: 39-49.
- Aguado, J., Arsuaga, J. M., Arencibia, A., Lindo, M. and Gascón, V. 2009. Aqueous heavy metals removal by adsorption on amine-functionalized mesoporous silica. Journal of Hazardous Materials 163: 213-221.
- Blasco, T., Corma, A., Navarro, T., and Pariente, J. P. 1995. Synthesis, characterization and catalytic activity of Ti-MCM-41 structures, Journal of Catalysis 156: 65-74.
- Brunel, D., Cauvel, A., Fajula, F., and Drenzo, F. 1995. MCM-41 type silicas as supports for immobilized catalysts, zeolites: A refined tool for designing catalytic sites, Elsevier Science :173-180.

- Carrado, K. A. 2000. Synthetic organo- and polymer-clays: Preparation, characterization, and materials applications. Applied Clay Science 17: 1-23.
- Cooper, C. and Burch, R. 1999. Mesoporous materials for water treatment process. Water Research. 33: 3689-3694.
- Decottignies, M., Phalippou, J., and Zarzycki, J. 1978. Synthesis of glasses by hot-pressing of gels. Journal of Materials Science. 13: 2605-2615.
- EPA Method 551.1, 1990. Determination of Chlorination Disinfection Byproducts, chlorinated solvents, and Halogenated Pesticides/Herbicides in Drinking Water by Liquid-Liquid Extraction and Gas Chromatography with Electron-capture Detection. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OHIO.
- Fawell, J. (2000). Risk Assessment Case Study-Chloroform and Related Substances. Food Chem. Toxicol. 38, S91-S95.
- Ghouti, M. A., Khraishes, M. A. M., Allen, S. J., and Ahmed, M. N. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. J. Environ. Manage. 69: 229-238.
- Gontier, S. and Tuel, A. 1995. Synthesis and characterization of Ti-containing mesoporous silicas. Zeolites. 15: 601-610
- Kruk, M., Jaroniec, M., and Sayari, A. 1997. Structural and surface properties of siliceous and titanium-modified HMS molecular sieves. Microporous Materials. 9: 173-182.
- Kruk, M., Jaroniec, M., and Sayari, A. 1999. Influence of hydrothermal restructuring conditions on structural properties of mesoporous molecular sieves. Microporous and Mesoporous Materials. 27: 217-229.
- Lee, B. H., Kim, Y. H., Lee, H. J., and Yi, J. H. 2001. Synthesis of functionalized porous silicas via templating methods as heavy metal ion adsorbents: the introduction of

- surface hydrophilicity onto the surface of adsorbents. Microporous and Mesoporous Materials. 50 (1): 77-90.
- Li, J., Wang, L., Qi, T., Zhou, Y., Liu, C., Chu, J. and Zhang, Y. 2008. Different N-containing functional groups modified mesoporous adsorbents for Cr(VI) sequestration: Synthesis, characterization and comparison. Microporous and Mesoporous Materials 110: 442-450.
- Lu, C., Chung, Y-L., and Chang, K-F. 2005. Adsorption of trihalomethanes from water with carbon nanotubes. Water Research. 39: 1183-1189.
- Marhaba, T.F., and Washington, M.B. (1998). Drinking Water Disinfection By-products: History and Current Practice. Adv. Env. Res. 2 (1), 103-115.
- Mercier, L. and Pinnavaia, T.J. 1997. Access in mesoporous material: advantages of a uniform pore structure in the design of a heavy metal ion adsorbent for environmental remediation. Advance Materials. 9: 500-503.
- Mohamed, M. M., Salama, T. M., and Yamaguchi, T. 2002. Synthesis, characterization and catalytic properties of titania-silica catalysts. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects. 207: 25-32.
- Morawski, A. W. and Inagaki, N. 1997. Application of modified synthetic carbon for adsorption of trihalomethanes (THMs) from water. Desalination. 114: 23-27.
- Morawski, A. W., Kalenczuk, R. and Inagaki, M. 2000. Adsorption of trihalomethanes (THMs) onto carbon spheres. Desalination. 130: 107-112.
- Newalkar, B. L., Choudary, N. V., Turaga, U. T., Vijayalakshim, R. P., Kumar, P., Komarneni, S., and Bhat, T. S. G. 2003. Adsorption of light hydrocarbons on HMS type mesoporous silica. Microporous and Mesoporous Materials. 65: 267-276.
- Partiff, G. D., and Rochester, C. H. 1983. Adsorption of small molecules, adsorption from solution at the solid/liquid interface. Academic Press: 4-41.

- Punyapalakul, P. and Takizawa, S. 2004. Effect of organic grafting modification of hexagonal mesoporous silicate on haloacetic acids removal. Environmental Engineering Forum. 44: 247-256.
- Punyapalakul, P. and Takizawa, S. 2006. Adsorption and recovery of alkylphenol polyethoxylates from synthetic wastewater using hexagonal mesoporous silicate. Water Science & Technology. 53: 137-143.
- Punyapalakul, P. and Takizawa, S. 2006. Effect of surface functional group on adsorption of organic pollutants on hexagonal mesoporous silicate. Water Science & Technology : Water Supply. 6: 17-25.
- Punyapalakul, P. and Satoshi, T. 2006. Selective adsorption of nonionic surfactant on hexagonal mesoporous silicates (HMSs) in the presence of ionic dyes. Water Research 40: 3177- 3184.
- Punyapalakul, P., Soonglerdsongpha, S., Kanlayaprasit, C., Ngamcharussrivichai, C. and Khaodhair, S. 2009. Effects of crystalline structures and surface functional groups on the adsorption of haloacetic acids by inorganic materials. Journal of Hazardous Materials 171: 491-499.
- Renzo, F. D.; Testa, F.; Chen, J. D.; Cambon, H.; Galarneau, A.; Plee, D.; and Fajula, F. 1999. Textural control of micelle-templated mesoporous silicates: the effects of co-surfactants and alkalinity. Microporous and Mesoporous Materials. 28: 437-446.
- Roy, S., Bandyopadhyay, S., and Chakravorty, D. 1996. Sol-gel synthesis of colloidal silica using cyclohexane. Journal of Materials Science Letter 15: 1872-1874.
- Shemer, H. and Narkis, N. 2005. Sonochemical removal of trihalomethanes from aqueous solution. Ultrasonics Sonochemistry. 12: 495-499.
- Suwat Soonglerdsongpha. Removal of Haloacetic Acid by Adsorption on Mesoporous Silicates. Thesis for Master Degree Science Program in Environmental Management Graduate School Chulalongkorn University. 2006

- Tanev, P. T., Chibwe, M., and Pinnavaia, T.J. 1994. Titanium-containing mesoporous molecular sieves for catalytic oxidation of aromatic compounds. Lett. Nat. 368: 321-323.
- Tanev, P. T., and Pinnavaia, T. J. 1995. A neutral templating route to mesoporous molecular sieves. Science. 20: 865-867.
- Tanev, P. T. and Pinnavaia, T. J. 1996. Mesoporous Silica Molecular Sieves Prepared by Ionic and Neutral Surfactant Templating: A Comparison of Physical Properties. Chemistry of Materials 8: 2068-2079.
- Tuel, A. 1999. Modification of mesoporous silicates by incorporation of heteroelements in the framework. Microporous and Mesoporous Materials. 27: 151-169.
- USEPA (2009). Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproduct Rule (Stage 2 DBP rule) [Online] Available from : <http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/www.epa.gov/safewater/stage2/index.html> [2009, September 5].
- USEPA (2010). List of substance [Online] Available from : <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList> (14 November 2010).
- Uyak, V., Yavuz, S., Toroz, I., Ozaydin, S., and Genceli, E. A. 2007. Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption. Des alienation. 216: 334-344.
- Wang, L., Wang, Z., Zhao, J., Yuan, Z., Yang, H., and Zhao, M. 1999. Preparation of mesoporous silica by co-precipitation in the presence of non-ionic surfactant. Materials Chemistry and Physics. 59: 171-174.
- Wei, F., Gu, F. N., Zhou, Y., Gao, L. Yang, J. and Zhu, J. H. 2009. Modifying MCM-41 as an efficient nitrosamine trap in aqueous solution. Solid State Sciences 11: 402- 410.
- WHO. (2005). Trihalomethanes in drinking-water: background document for development of who guidelines for drinking-water quality; WHO/SDE/WSH/05.08/64.

Yang, C.Y., Chiu, H.F., Cheng, M.F., Tsai S.S. (1998). Chlorination of drinking water and cancer mortality in Taiwan. *Environ . Res. Sec A*; 78: 1-6.

Yue, Y. H., Sun, Y., Xu, Q., and Gao, Z. 1998. Catalysis activities and properties of AIHMS mesoporous molecular sieves. *Applied Catalysis*. 175: 131-137.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มในการดูดซับไตรฮาโลมีเทน

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ THMs ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตารางที่ ก.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ CHCl_3 ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

HMS		A-HMS		M-HMS		A5M5-HMS		OD-HMS		PAC	
t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t
0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0	0.00
0.17	13.59	0.25	8.97	0.02	43.82	0.02	37.9	0.17	29.90	0.02	57.76
0.50	24.38	1	22.51	0.05	57.96	0.05	59.1	0.50	23.16	0.05	58.67
1	25.12	2	29.61	0.12	56.48	0.12	67.7	1	32.69	0.08	62.08
2	27.15	3	38.05	0.23	63.40	0.25	70.7	2	36.26	0.12	63.34
4	30.33	4	43.71	0.33	63.61	0.50	76.9	4	53.06	0.42	63.59
6	32.01	5.1	47.02	3	67.09	1	80.9	6	60.09	1	63.98
12	33.97	6	48.38	6	67.47	3	85.0	12	62.37	2	64.16
24	34.35	12	49.27	12	67.47	5	85.9	24	62.48	3	64.13
		24	50.67	24	67.47	8	86.4			4	64.13
						12	86.7			5	64.20
						24	86.7			5	64.13
										5	64.13
										12	64.13
										24	63.34

ตารางที่ ก.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับ CHBrCl_2 ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

HMS		A-HMS		M-HMS		A5M5-HMS		OD-HMS		PAC	
t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t
0.00	0.00	0.00	0	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.00
0.02	156	0.02	169	0.0	307	0.02	550	0.02	146	0.02	2392
0.05	167	0.05	202	0.1	403	0.05	742	0.05	174	0.05	3067
0.12	172	0.12	314	0.1	506	0.12	1036	0.12	238	0.12	3434
0.23	190	0.25	398	0.3	596	0.25	1376	0.25	363	0.25	3719
0.47	254	0.50	503	0.5	671	0.50	1642	0.50	389	0.50	3869
1	336	1	644	1	763	1	2018	1	401	1	3964
2	397	2	748	2	875	2	2263	2	450	2	4028
5	433	3	812	3	947	3	2434	4	482	3	4046
12	439	5	847	5	994	5	2587	6	511	4	4058
24	444	7	877	7	1015	7	2621	8	514	7	4062
		12	882	12	1018	12	2625	12	515	12	4084
		24	884	24	1018	24	2637	24	516	24	4080

ตารางที่ ก.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ CHBr_2Cl ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

HMS		A-HMS		M-HMS		A5M5-HMS		OD-HMS		PAC	
t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t
0.00	0.00	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.00
0.02	13	0.00	38	0.02	176	0.02	137	0.02	96	0.02	2733
0.05	15	0.02	59	0.05	220	0.05	564	0.05	123	0.05	3032
0.12	21	0.05	83	0.12	245	0.12	754	0.12	173	0.12	3574
0.25	33	0.12	106	0.25	304	0.25	884	0.25	223	0.25	3834
0.50	39	0.25	131	0.50	347	0.50	1035	0.50	265	0.50	3892
1	97	0.50	148	1	387	1	697	1	345	1	3999
2	127	1	167	2	461	2	1360	2	386	2	4002
4	189	3	176	3	519	3	1527	3	462	3	4044
8	221	5	182	5	578	5	1764	5	525	5	4067
12	229	8	183	7	602	7	1847	7	561	7	4074
24	230	12	183	12	615	12	1922	12	589	12	4070
		24	38	24	617	24	1926	24	597	24	4071

ตารางที่ ก.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ CHBr_3 ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

HMS		A-HMS		M-HMS		A5M5-HMS		OD-HMS		PAC	
t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t	t (h)	q_t
0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	945
0.02	13	0.02	8	0.02	32	0.02	106	0.02	29	0.02	1120
0.05	15	0.05	15	0.05	51	0.05	65	0.05	37	0.05	1262
0.12	21	0.12	17	0.12	70	0.12	71	0.12	38	0.12	1294
0.25	33	0.25	31	0.25	79	0.25	79	0.25	38	0.25	1311
0.50	39	0.50	79	0.50	100	0.50	98	0.50	67	0.50	1322
1	97	1	96	1	114	1	185	1	91	1	1329
2	127	2	116	2	134	2	259	2	115	2	1333
4	189	3	142	3	166	3	329	3	139	3	1338
8	221	5	178	4	195	4	390	5	175	5	1339
12	229	7	200	7	216	7	485	7	197	7	1340
24	230	12	213	12	224	12	514	12	220	12	1341
		24	219	24	224	24	525	24	223	24	945

2. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ THMs ของตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ ก.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHCl_3 ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7

HMS			A-HMS			M-HMS		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
43.14	2.510	38.94	92.39	0.628	91.34	87.59	5.594	7.471
92.39	7.472	79.86	160.1	4.374	152.7	146.3	8.418	14.73
139.0	17.32	110.1	188.4	11.62	168.8	268.6	9.814	36.01
160.0	19.71	126.9	208.7	23.37	169.7	319.4	10.83	51.14
188.4	21.18	152.9	328.2	55.61	235.4	360.1	38.93	134.4
208.7	29.32	159.6						
328.2	48.02	248.0						
A5M5-HMS			OD-HMS			PAC		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
53.44	20.00	25.00	88.8	18.59	57.65	187.9	532.7	4.988
155.4	58.06	115.7	187.9	27.50	141.8	256.8	732.1	10.39
246.0	90.15	187.1	292.6	35.86	200.8	292.6	824.2	15.13
344.2	121.4	262.8	341.8	45.10	266.4	341.7	961.6	18.01
419.0	157.1	312.1				474.7	1303	36.06

ตารางที่ ก.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHBrCl_2 ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7

HMS			A-HMS			M-HMS		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
291.6	47.42	212.5	280.4	4.212	273.4	280.4	2.060	277.0
604.6	97.04	441.8	757.3	128.3	543.0	757.3	91.01	607.4
946.7	177.99	650.0	1351	328.1	802.0	1351	296.2	863.4
998.6	195.46	772.3	1873	441.7	1124	1873	469.7	1087
			2722	747.4	1484	2722	690.0	1572
A5M5-HMS			OD-HMS			PAC		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
201.4	83.74	145.04	280.4	2.578	276.1	291.6	170.6	7.129
441.9	162.8	330.72	757.3	153.0	501.3	604.5	355.9	7.835
700.4	272.5	520.49	1351	358.0	753.3	946.7	560.5	8.720
796.6	298.8	599.38	1873	489.2	1053	998.5	590.1	9.150
845.7	321.9	626.80	2722	803.6	1380	1194	707.8	10.11
1054	365.4	810.69				1252	740.9	10.56
						1639	971.2	11.28

ตารางที่ ก.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHBr_2Cl ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7

HMS			A-HMS			M-HMS		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
180.4	67.89	65.25	180.4	13.66	157.3	191.8	46.25	115.2
387.5	143.0	144.9	387.5	16.53	359.9	395.0	98.01	232.0
557.3	186.7	239.9	557.3	28.53	509.6	581.5	129.5	364.7
703.7	248.7	283.4	752.8	45.37	676.9	789.1	179.3	491.5
752.8	247.7	337.5	1090	65.19	980.6	1072	238.1	675.2
A5M5-HMS			OD-HMS			PAC		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
129.2	15.69	118.8	137.5	0.2338	142.9	182.9	544.4	1.424
261.7	24.97	244.9	360.9	40.42	293.7	386.9	1141	2.832
405.5	40.59	378.7	606.7	94.57	449.7	554.0	1662	5.475
462.6	44.22	432.1	709.5	113.3	522.5	759.8	2236	7.219
731.0	81.94	675.0				980.2	2932	12.73

ตารางที่ ก.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHBr_3 ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7

HMS			A-HMS			M-HMS		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
128.7	0.476	127.9	38.18	0.308	37.66	69.09	18.36	38.48
262.7	0.888	267.4	99.12	9.684	82.72	141.9	29.49	92.93
395.0	7.849	382.0	183.9	19.70	150.7	226.2	46.53	148.3
530.8	35.88	470.6	212.6	25.51	169.3	295.7	61.23	193.3
647.2	75.33	521.1				414.0	80.90	278.9
900.2	155.7	638.7						
A5M5-HMS			OD-HMS			PAC		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
64.79	29.26	45.67	58.52	0.492	57.71	46.86	137.0	0.289
100.1	26.24	82.00	124.0	1.431	121.7	106.04	316.8	0.442
204.2	34.79	180.2	206.4	8.484	192.5	158.67	474.0	0.674
273.2	40.15	245.7	244.4	12.41	223.9	188.41	531.3	0.694
308.3	39.98	281.3	303.2	28.74	255.4	276.6	843.6	1.023
361.0	47.41	328.3	349.6	40.73	282.2			
			390.0	52.61	303.2			

3. การศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ THMs ของตัวกลางดูดซับ M-HMS

ตารางที่ ก.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHCl_3 ของตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5, 7 และ 9

pH 5			pH 7			pH 9		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
91.97	4.604	84.47	87.59	5.594	7.471	83.25	13.80	60.25
179.8	19.37	147.8	146.3	8.418	14.73	158.7	22.93	121.2
260.6	25.67	218.1	268.6	9.814	36.01	234.0	32.47	179.8
318.2	37.19	257.1	319.4	10.83	51.14	295.4	38.59	232.1
473.0	45.07	398.6	360.1	38.93	134.4	386.1	52.36	300.2

ตารางที่ ก.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHBrCl_2 ของตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5, 7 และ 9

pH 5			pH 7			pH 9		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
131.8	30.73	91.59	280.4	2.060	277.0	173.3	17.06	150.4
249.9	54.08	179.4	757.3	91.01	607.4	331.1	38.86	278.5
397.2	99.57	266.1	1351	296.2	863.4	526.8	77.06	423.5
475.5	111.75	323.2	1873	469.7	1087	612.8	90.79	492.3
			2722	690.0	1572			

ตารางที่ ก.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHBr_2Cl ของตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5, 7 และ 9

pH 5			pH 7			pH 9		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
133.3	41.93	78.24	191.8	46.25	115.2	103.1	22.85	71.93
265.0	76.87	164.2	395.0	98.01	232.0	212.9	25.42	179.1
387.4	101.8	250.2	581.5	129.5	364.7	322.9	47.69	258.4
451.6	103.9	314.4	789.1	179.3	491.5	377.3	45.20	315.9
524.1	127.6	353.5	1072	238.1	675.2	426.3	51.36	358.1
568.4	118.2	410.4				591.3	73.79	492.7
695.8	159.0	482.7						

ตารางที่ ก.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CHBr_3 ของตัวกลางดูดซับ M-HMS ที่พีเอช 5 ,7 และ 9

pH 5			pH 7			pH 9		
C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)	C_0 ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/g}$)	C_e ($\mu\text{g/L}$)
23.43	24.60	55.58	69.09	18.36	38.48	62.82	3.002	58.85
55.44	47.14	118.9	141.9	29.49	92.93	98.26	3.458	93.68
88.37	76.62	187.2	226.2	46.53	148.3	121.0	10.11	107.6
104.4	87.89	222.1	295.7	61.23	193.3	140.0	10.95	125.3
126.6	100.6	260.2	414.0	80.90	278.9	167.7	22.18	137.6
						214.8	39.38	161.2

4. การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ของตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ ก.13 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (µg/L)	q _e (µg/g)	C _e (µg/L)	C ₀ (µg/L)	q _e (µg/g)	C _e (µg/L)
57.05	9.245	41.70	274.7	35.93	215.1
110.0	11.87	90.10	543.6	56.31	449.2
178.9	17.19	150.5	793.7	73.30	672.5
327.1	36.32	265.9	1097	83.54	957.3
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (µg/L)	q _e (µg/g)	C _e (µg/L)	C ₀ (µg/L)	q _e (µg/g)	C _e (µg/L)
193.3	159.2	159.2	57.37	3.363	51.79
406.1	348.5	348.5	139.8	11.62	120.3
602.3	529.7	529.7	211.3	10.74	193.6
1074	961.2	961.2	298.0	14.65	273.4

ตารางที่ ก.14 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ A-HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
57.05	8.886	42.12	274.7	28.27	227.2
110.0	12.69	88.60	543.6	44.17	469.1
178.9	21.02	143.3	793.7	61.58	689.5
327.1	45.73	250.8	1097	79.54	962.6
			1445	90.35	1294
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
193.4	13.65	170.4	57.37	2.205	53.67
406.2	23.22	367.0	139.8	4.870	131.6
602.3	23.07	563.2	211.4	15.42	185.3
1074	33.53	1018	298.0	29.43	248.1

ตารางที่ ก.15 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ M-HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
110.9	26.01	67.50	385.8	87.08	240.3
223.2	57.41	126.9	769.5	192.2	447.2
357.2	97.79	192.9	1140	271.1	685.0
422.0	101.5	250.8	1462	337.1	894.3
633.9	157.2	369.8	2007	440.6	1266
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
208.4	53.58	118.9	91.69	27.59	45.61
431.1	118.9	231.7	198.1	58.79	99.58
617.6	149.4	366.6	287.1	74.85	161.3
838.7	209.6	485.1	403.4	113.3	212.2
1115	264.8	671.0	537.1	151.2	283.0

ตารางที่ ก.16 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ OD-HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
110.9	29.24	62.30	385.7	77.36	257.1
223.2	42.68	152.4	769.5	112.3	583.4
357.2	64.11	251.4	1140	127.9	929.4
422.1	64.29	315.9	1462	160.4	1198
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
208.4	34.05	151.8	91.69	16.49	64.26
431.1	48.09	351.4	198.1	22.74	160.5
617.6	41.19	549.7	287.1	15.84	260.9
838.7	64.31	732.6	403.4	36.71	342.8

ตารางที่ ก.17 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ PAC

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
66.19	164.5	9.156	283.0	779.2	12.91
125.1	272.9	32.29	601.5	1700	23.33
173.2	433.6	21.43	876.6	2411	32.69
218.0	550.3	27.23	1176	3262	45.41
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
203.5	582.6	1.539	70.93	202.7	0.641
442.8	1291	3.587	159.1	463.4	1.529
657.7	1862	5.963	236.2	670.7	1.476
910.5	2592	11.79	335.4	961.1	2.249

ตารางที่ ก.18 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำประปา ของ HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
88.68	18.17	58.76	268.1	41.56	199.6
172.21	33.20	116.4	879.1	87.30	589.0
269.3	28.41	174.9	967.3	128.1	752.9
329.4	65.95	219.5	1290	155.7	1030
299.2	45.76	222.6			
447.5	79.61	314.6			
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
167.3	24.29	127.4	58.49	8.003	45.31
370.9	59.03	271.7	150.8	23.92	110.6
713.3	95.92	552.8	222.6	16.76	166.9
945.3	115.0	753.2	299.3	46.44	221.5
			378.0	53.88	288.0

ตารางที่ ก.19 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำประปา ของ A-HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
95.85	1.338	93.64	553.3	300.2	54.97
217.4	13.596	194.9	884.8	483.2	81.08
344.0	34.23	287.1	1035	563.1	89.50
395.2	48.54	313.6	1120	603.7	120.3
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
462.5	257.3	35.35	54.60	1.284	52.47
741.2	410.7	58.01	135.1	4.956	126.9
876.1	482.3	65.77	225.56	13.93	202.4
954.4	520.1	92.78	268.5	18.29	237.8

ตารางที่ ก.20 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำประปา ของ M-HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
217.4	29.98	167.4	553.3	302.8	47.72
344.0	58.19	246.7	884.8	486.9	69.94
395.2	95.11	237.0	1035	581.3	68.62
421.5	87.53	275.9	1120	624.8	81.18
579.3	146.5	334.7	1556	874.4	95.79
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
185.9	6.541	175.0	49.60	4.124	42.72
462.5	81.40	326.6	135.1	30.6	83.99
741.2	139.0	508.6	225.5	56.51	130.9
876.1	223.4	504.4	268.5	80.12	135.2
954.4	200.3	621.3	297.8	76.52	170.5
1322	358.0	724.4	412.7	136.0	185.5

ตารางที่ ก.21 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำประปา ของ OD-HMS

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
88.68627	17.14336	60.28543	268.1156	39.30353	203.0027
172.2082	30.92831	120.9703	548.1178	89.98382	399.0446
269.3379	51.03389	183.9412	795.1356	106.5657	616.8157
329.4088	68.22649	217.2899	950.3407	142.3383	716.4313
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
167.3933	22.63025	129.9026	58.49131	7.962294	45.30044
370.8998	57.5225	275.6041	150.7916	27.05584	105.9691
568.9487	74.77353	443.8277	222.6254	24.2539	182.0406
670.2799	96.77721	511.2427	278.7431	39.38405	214.0219
			378.0075	29.62113	328.8364

ตารางที่ ก.22 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม THMs ในน้ำประปา ของ PAC

CHCl ₃			CHBrCl ₂		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
190.5436	444.2541	45.42064	309.407	921.5329	23.7318
286.0722	679.6793	73.10605	573.4366	1606.673	48.59019
312.0641	690.8099	74.88608	889.4378	2544.255	92.23804
372.8416	884.9954	83.7431	986.3891	2596.224	95.01884
			1213.832	3382.093	109.0146
CHBr ₂ Cl			CHBr ₃		
C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)	C ₀ (μg/L)	q _e (μg/g)	C _e (μg/L)
182.79	571.9583	5.482966	67.34865	208.607	2.680484
368.2504	1098.685	9.346698	126.7669	381.6548	2.093026
584.0472	1791.567	22.68948	203.1206	635.2453	4.077041
656.5198	1843.094	23.7241	233.3815	667.6741	4.146738
847.3938	2508.691	27.888	283.4686	852.7848	4.892226
1246.414	3474.091	30.48195			

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชราภรณ์ วิวัฒน์พงศ์เพชร เกิดวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สาขาวิชาเคมีทรัพยากร
สิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550
หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2551