

ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิกาต่อการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก



นางสาวชุติมา กัลยาประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SURFACE FUNCTIONAL GROUPS OF MESOPOROUS SILICATES  
ON HALOACETIC ACIDS ADSORPTION



Miss Chutima Kanlayaprasit

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของหมูฟังกซ์บนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิติเกตต์ออกา

ดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก

โดย

นางสาวชุตินา กัลยาประสิทธิ์


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

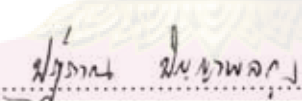
อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

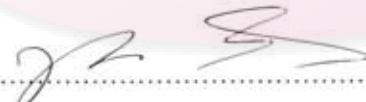
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

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

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปิยาภรณ์ สงประเสริฐ)

ศูนย์วิทยุโทรพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดิมา กัลยาประสิทธิ์ : ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิลิเกตต่อการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก. (EFFECTS OF SURFACE FUNCTIONAL GROUPS OF MESOPOROUS SILICATES ON HALOACETIC ACIDS ADSORPTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 141 หน้า.

กรดฮาโลอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำดื่ม และน้ำประปาซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์มีโซพอร์ซิลิเกตและปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต รวมทั้งแทนที่ธาตุโลหะไททานเนียมในโครงสร้างผลึก เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก 5 ชนิด (HAA<sub>5</sub>) โดยทำการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับของ HAA<sub>5</sub> ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-200 µg/l) รวมถึงผลของพีเอช และโครงสร้างโมเลกุลของ HAA<sub>5</sub> ต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่า พื้นผิวจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> สูง ส่วนมีโซพอร์ซิลิเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโนมีความสามารถในการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเนื่องมาจากผลของประจุบวกบนพื้นผิว ในขณะที่มีโซพอร์ซิลิเกตที่มีหมู่ซิลานอล ยังคงมีความสามารถในการดูดซับสูงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนและพื้นที่ผิวจำเพาะ นอกจากนี้กลุ่มของกรดคลอโรอะซิติกจะถูกดูดซับได้ดีกว่ากลุ่มของกรดโบโรโมอะซิติก โดยกรดโมโนคลอโรอะซิติกที่มีธาตุฮาโลเจน 1 อะตอมถูกดูดซับได้ดีที่สุด ส่วนความสามารถในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงยังคงสูงกว่ามีโซพอร์ซิลิเกตชนิดต่างๆ จากการศึกษาผลของพีเอชพบว่า ที่พีเอช 5 มีแนวโน้มที่ HAA<sub>5</sub> จะถูกดูดซับได้ดีกว่า ส่วนความสามารถในการดูดซับที่พีเอช 9 มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแปรผันตามแรงทางไฟฟ้าและความแรงของพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกการดูดซับ HAA<sub>5</sub> พบว่า ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของกรด HAA<sub>5</sub> ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> แบบผสมโดยถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีต่ำกว่ามีโซพอร์ซิลิเกตชนิดต่างๆ เนื่องมาจากเกิดการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ ส่วนประจุในน้ำประปามีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> โดย PAC

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่อนิสิต ไทมา กัลยาประสิทธิ์.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ปฏิภาณ.....

ปีการศึกษา...2551

## 4970283721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : HALOACETIC ACIDS / MESOPOROUS SILICATES / ADSORPTION / SURFACE FUNCTIONAL GROUPS

CHUTIMA KANLAYAPRASIT : EFFECTS OF SURFACE FUNCTIONAL GROUPS OF MESOPOROUS SILICATES ON HALOACETIC ACIDS ADSORPTION. ADVISOR : PATIPARN PUNYAPALAKUL, DR., 141 pp.

In this study, adsorption efficiencies of haloacetic acids (HAA<sub>5</sub>), disinfection by products (DBPs), by using synthesized hexagonal mesoporous silicates (HMSs) were investigated. HMSs were synthesized and modified by surface organic functional groups grafting, including titanium substitution in crystalline structure. Kinetics and adsorption isotherm of 5 types of HAA<sub>5</sub> at low concentration were investigated including the effects of pH and HAA<sub>5</sub> molecular structures on adsorption mechanism. The results showed that 3-mercaptopropyltrimethoxysilane grafted HMS had high adsorption capacities caused by specific surface area. However, 3-aminotriethoxysilane grafted HMS had highest adsorption capacities per square meter, due to the positive surface charge. This study found that the adsorption capacities of chlorine group were higher than bromine group. HAA<sub>5</sub> adsorption capacities of PAC were higher than synthesized HMSs. Furthermore, adsorption capacities of synthesized HMSs at pH 5 were higher than pH 9 due to electrostatic interaction and hydrogen bonding. The selectivity of HAA<sub>5</sub> adsorption depended on type and number of halogen atom in HAA<sub>5</sub> molecular structure. Adsorption efficiencies of mixed HAA<sub>5</sub> on PAC were lower than HMSs, caused by competitive surface accessibility of PAC. Moreover, co-existing electrolytes in tap water can affect to mixed HAA<sub>5</sub> adsorption capacities of PAC significantly.

Department : Environmental Engineering

Student's Signature

*Chutima K.*

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature

*P. P.*

Academic Year : 2008

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เอาใจใส่ คอยสละเวลาให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ ข้อแนะนำที่เป็นประโยชน์ และช่วยเหลือให้ งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งยังเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดมา ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล และ ดร.ปิยาภรณ์ สงประเสริฐ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละ เวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้คำแนะนำดี ๆ เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความรู้ เป็น ประโยชน์ในการวิจัย รวมทั้งครูปฏิบัติกรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณพี่เหม้ม ที่สอนและฝึกการใช้เครื่อง GC/ECD ขอขอบคุณพี่สุวัฒน์ ที่ให้คำแนะนำต่างๆเป็นแนวทางในการวิจัย รวมไปถึงสอนวิธีการ วิเคราะห์ และอื่นๆอีกมากมายที่เป็นประโยชน์สำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก ขอขอบคุณไอ ที่ เดินมาด้วยกันและอยู่เคียงข้างกันมาตลอด คอยช่วยเหลือ และเป็นพี่ปรึกษาต่างๆมากมาย ขอขอบคุณน้องเกิ้ล น้องเพลง และน้องบี ที่ช่วยเหลือ และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นต่างๆที่น่าสนใจ

ขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่คอยพูดคุย สร้างเสียงหัวเราะ อีกทั้งยังคอยช่วยเหลือ ให้หยิบยืมอุปกรณ์ที่ขาดเหลือในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ขอขอบคุณกำลังใจดี ๆ จากเพื่อนๆที่ไม่ค่อยได้เจอกัน ขอขอบคุณพี่ๆและน้องๆทุกคนที่แม้รู้จักกันไม่นานแต่ก็เหมือนรู้จักกัน มานานมาก ขอขอบคุณที่ร่วมฝ่าฟันความเหนื่อยยากด้วยกันมาตลอด ขอขอบคุณกำลังใจที่มองไม่เห็น แต่ก็เป็นแรงใจให้ผู้ที่วิจัยเสมอมา ขอขอบคุณที่มาให้เจอกันตลอด ขอขอบคุณจริงๆ ทั้งนี้อาจเอ่ยนาม ได้ไม่หมดแต่ต้องขอขอบคุณทุกคนจากใจ

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว และทุกคนในครอบครัว ที่ให้ ความช่วยเหลือในทุกด้านเป็นอย่างดี เข้าใจ และคอยให้กำลังใจ ส่งเสริมและสนับสนุนการศึกษา มาตลอด จนทำให้การศึกษาในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กรดฮาโลอะซีติก.....	5
2.2 เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต.....	7
2.3 การดูดซับ.....	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	27
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	54
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	54
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก.....	64
4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก.....	74
4.4 การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	97
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	97

รายการอ้างอิง.....	หน้า
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของมีโซพอร์สซิลิเกต.....	105
ภาคผนวก ข การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มในการดูดซับ กรดฮาลออะซิติก.....	106 112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141



# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮาโลอะซิติกชนิดต่าง.....	6
2.2	อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต.....	10
3.1	อัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์.....	33
3.2	หมู่ฟังก์ชันที่พบในมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	38
3.2	ตัวแปรในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกรดฮาโลอะซิติกบนพื้นผิวของสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	43
3.4	ตัวแปรในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก.....	45
3.5	ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก.....	47
3.6	ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อนำน้ำกลั่นและควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.....	49
3.7	ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อนำน้ำประปา.....	51
4.1	พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	58
4.2	ค่า $pH_{zpc}$ ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	62
4.3	สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	64
4.4	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	68
4.5	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	69
4.6	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	70
4.7	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	71

ตารางที่	หน้า	
4.8	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	72
ก.1	ปริมาณไนโตรเจนของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	107
ก.2	ปริมาณซิลเฟอร์ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	107
ก.3	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ PAC.....	108
ก.4	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ HMS.....	108
ก.5	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ Ti-HMS.....	109
ก.6	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A-HMS.....	109
ก.7	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ M-HMS.....	110
ก.8	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A3M7.....	110
ก.9	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A5M5.....	111
ก.10	การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A7M3.....	111
ข.1	การศึกษাজลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด MCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	113
ข.2	การศึกษাজลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	114
ข.3	การศึกษাজลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	115
ข.4	การศึกษাজลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด MBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	116
ข.5	การศึกษাজลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	117
ข.6	การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7.....	118
ข.7	การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7.....	119
ข.8	การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7.....	120





## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ประเภทและลักษณะของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	8
2.2	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต.....	9
2.3	กลไกที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตโดยใช้ $S^{0}I^0$ pathway.....	10
2.4	การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันโดยวิธี Direct co-condensation method.....	11
3.1	แผนการทดลองในการดำเนินการวิจัย.....	30
3.2	กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนและความดันสัมพัทธ์จากสมการของ BET.....	35
4.1	ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ (a) HMS และ (b) Ti-HMS.....	55
4.2	ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3.....	55
4.3	ไอโซเทอร์มในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	57
4.4	สเปกตรัม FT-IR ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ.....	59
4.5	มีโซพอร์สที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (a) หมู่อะมิโน (b) หมู่เมอร์แคปโต (c) หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต.....	60
4.6	ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของ A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3.....	61
4.7	ประจุบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	62
4.8	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของ (a) HMS (b) Ti-HMS (c) A-HMS (d) M-HMS (e) A3M7 (f) A5M5 (g) A7M3 (h) PAC.....	65
4.8 (ต่อ)	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของ (a) HMS (b) Ti-HMS (c) A-HMS (d) M-HMS (e) A3M7 (f) A5M5 (g) A7M3 (h) PAC.....	66
4.9	ความสามารถในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	75
4.9 (ต่อ)	ความสามารถในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	76

รูปที่	หน้า	
4.10	ความสามารถของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่.....	78
4.10	ความสามารถของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆในการดูดซับ (a) MCAA (ต่อ) (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่.....	79
4.11	เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซิติกต่อความสามารถในการดูดซับของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆและถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	80
4.11	เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซิติกต่อความสามารถในการดูดซับของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆและถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	81
4.12	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ MCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9.....	83
4.13	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9.....	84
4.14	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9.....	85
4.15	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ MBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9.....	86
4.16	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9.....	87
4.17	แสดงความแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เปลี่ยนไปของ (a) HMS, (b) A-HMS และ (c) M-HMS เมื่อพีเอชเปลี่ยนไป.....	89
4.18	ความสามารถในการดูดซับกรด HAA <sub>5</sub> ในน้ำกลั่น ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	91
4.18	ความสามารถในการดูดซับกรด HAA <sub>5</sub> ในน้ำกลั่น ของ HMS, Ti-HMS, (ต่อ) A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	92
4.19	ความสามารถในการดูดซับกรด HAA <sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	94
4.19	ความสามารถในการดูดซับกรด HAA <sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ HMS, Ti-HMS, (ต่อ) A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC.....	95

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรดฮาโลอะซีติกเป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนในการผลิตน้ำดื่มหรือน้ำประปา ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างคลอรีนหรือ โบรมีนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ ซึ่งกรดฮาโลอะซีติกนั้นมีทั้งหมด 9 ชนิด แต่มี 5 ชนิด ที่มีการออกกฎหมายเพื่อควบคุมปริมาณในน้ำดื่มเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก กรดไดคลอโรอะซีติก กรดไตรคลอโรอะซีติก กรดโมโนโบรมอะซีติก และกรดไดโบรมอะซีติก จากการศึกษาวิจัยพบว่า กรดฮาโลอะซีติกเป็นสารที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็ง ได้แก่ มะเร็งในกระเพาะปัสสาวะ และ มะเร็งลำไส้ นอกจากนี้ ยังส่งผลกระทบต่อหญิงมีครรภ์ ซึ่งหากหญิงมีครรภ์ได้รับกรดฮาโลอะซีติกเข้าสู่ร่างกาย อาจทำให้เกิดภาวะผิดปกติต่อทารกในครรภ์ได้ นอกจากนี้ ผลกระทบที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ความเป็นพิษของกรดฮาโลอะซีติกยังส่งผลกระทบต่อระบบการสืบพันธุ์ และหากได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูงจะส่งผลกระทบต่อระบบประสาทอีกด้วย ซึ่ง US EPA จัดประเภทของกรดไดคลอโรอะซีติกให้เป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์กลุ่ม B2 และกรดไตรคลอโรอะซีติกเป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์กลุ่ม C (Nissinen และคณะ, 2002)

จากความเป็นพิษดังกล่าว US EPA จึงได้ออกกฎหมายเพื่อบังคับควบคุมปริมาณของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำประปา ซึ่งสารเคมีกลุ่มใหญ่ที่เกิดขึ้นมากที่สุดในกระบวนการนี้ คือ ไตรฮาโลมีเทน รองลงมา คือ กรดฮาโลอะซีติก โดยค่าสูงสุดของระดับการปนเปื้อน (MCLs) ที่กฎหมายกำหนดเท่ากับ 60 ไมโครกรัมต่อลิตร

แม้จะมีการออกกฎหมาย เพื่อควบคุมไม่ให้ระดับของกรดฮาโลอะซีติกเกินมาตรฐาน แต่ระดับความเป็นพิษของกรดฮาโลอะซีติกนั้นนับวันยิ่งจะทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในปัจจุบันกำลังมีการศึกษาพิษวิทยาของกรดฮาโลอะซีติกอย่างแพร่หลาย ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้นutzer เกิดอันตรายจากการได้รับกรดฮาโลอะซีติกเข้าสู่ร่างกาย จึงต้องมีการบำบัดหรือกำจัดกรดฮาโลอะซีติกออกจากริ่ดน้ำดื่มหรือน้ำประปา ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดหรือกำจัดในปัจจุบันนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การกำจัดด้วยโอโซน การกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพ และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง แต่วิธีการเหล่านั้น ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกต่ำ

การดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดต่ำ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้ชนิดของสารตัวกลางดูดซับด้วย ในการกำจัดกรดฮาโลอะซิติกด้วยถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับกรดฮาโลอะซิติกซึ่งมีสมบัติความชอบน้ำสูงและมวลโมเลกุลต่ำได้น้อย อีกทั้งความสามารถในการเลือกดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ยังต่ำทำให้เกิดการแย่งพื้นที่ผิวในการดูดซับ จึงมีการพัฒนาตัวกลางดูดซับชนิดใหม่คือ เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต ซึ่งมีรูพรุนขนาดกลาง มีพื้นที่ผิวสูง และมีสมบัติในการคัดเลือกมลสารสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง นอกจากนี้หมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตนั้นยังมีสมบัติความชอบน้ำสูง ดังนั้นจึงคาดว่าจะสามารถดูดซับกรดฮาโลอะซิติกที่มีสมบัติความชอบน้ำสูงเช่นกันได้ดี อีกทั้งพื้นที่ผิวของมีโซพอร์สซิลิเกต ยังสามารถปรับปรุงลักษณะสมบัติได้ด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ชนิดต่างๆ หรือแทนที่ด้วยธาตุโลหะในโครงสร้างผลึก เช่น ไททาเนียม เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยเพื่อกำจัดกรดฮาโลอะซิติก โดยใช้มีโซพอร์สซิลิเกต หรือมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางดูดซับนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกทั้ง 5 ชนิด โดยใช้มีโซพอร์สซิลิเกต และมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวชนิดต่างๆเป็นสารตัวกลางดูดซับ โดยศึกษาจากผลพลศาสตร์ในการดูดซับของกรดฮาโลอะซิติกทั้ง 5 ชนิดบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันแบบต่างๆ และเติมธาตุโลหะในโครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับ ศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชัน และค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ อีกทั้งศึกษาสมบัติการคัดเลือกการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และผลของไอออนในน้ำประปาต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกทั้ง 5 ชนิด บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนพื้นผิวต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ



1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก บนมีโซพอร์สซิลิเกต ชนิดต่างๆ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยระดับทดลอง ดำเนินการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระหว่างเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2551 ถึง เดือนมกราคม พ.ศ.2552

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ทำการสังเคราะห์ และวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับได้แก่ มีโซพอร์สซิลิเกต และทำการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของตัวกลางดูดซับโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีทั้งแบบหมู่ฟังก์ชันเดี่ยว และ 2 หมู่ฟังก์ชันในสัดส่วนต่างๆกัน โดยหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ ได้แก่ หมู่เมอร์แคปโต และ หมู่อะมิโน และเพิ่มธาตุโลหะ คือ ไททาเนียม เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวตัวกลางดูดซับ

1.3.2 ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก โดยทำการทดลองแบบทีละเท (batch) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ทำการศึกษาการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก 5 ชนิด ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA), กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA), กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA), กรดโมโนโบรโมอะซีติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซีติก (DBAA)

1.3.3 ศึกษาผลของพีเอชที่ 5, 7 และ 9 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกทั้ง 5 ชนิด

1.3.4 ศึกษาสมบัติในการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับ โดยใช้สารละลายผสมของกรดฮาโลอะซีติก 5 ชนิด ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ทั้งในกรณีน้ำกลั่นและน้ำประปา

1.3.5 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประเมินประสิทธิภาพ ในการประยุกต์ใช้ตัวกลางดูดซับชนิดมีโซพอร์สซิลิเกต รวมทั้งการประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวกลางดูดซับอื่นๆในการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก จากน้ำประปาตามบ้านเรือนจากข้อมูลดังต่อไปนี้

1.4.1 ประสิทธิภาพ และความสัมพันธ์ของโครงสร้างโมเลกุลของกรดฮาโลอะซีติก และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกชนิดต่างๆของมีโซพอร์สซิลิเกต

1.4.2 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

1.4.3 ความสามารถในการคัดเลือกการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิด ของหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

1.4.4 ทราบถึงผลกระทบของไอออนต่างๆในน้ำประปา ที่มีผลต่อการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกของตัวกลางชนิดต่างๆ



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กรดฮาโลอะซีติก

##### 2.1.1 การเกิดกรดฮาโลอะซีติก

กรดฮาโลอะซีติก (HAAs) เป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant by-product, DBPs) ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มและน้ำประปา โดยเกิดร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) กรดฮาโลอะซีติกนั้นเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และกลายเป็นไอได้น้อย นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ดีและค่อนข้างเสถียร โดยปกติแล้วจะไม่พบกรดฮาโลอะซีติกตามธรรมชาติทั่วไป แต่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค กรดฮาโลอะซีติกที่มีโบรมีนเนื่องมาจากปริมาณโบรมีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ แหล่งกำเนิดกรดฮาโลอะซีติกอื่น ๆ นอกจากในธรรมชาติ กรดฮาโลอะซีติกจะเกิดมาจากกระบวนการต่างๆที่มีการใช้สารเคมี เช่น กระบวนการฟอกเนื้อไม้ในโรงงานกระดาษ การฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม และกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

การเกิดกรดฮาโลอะซีติก มีสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสารตั้งต้น ขณะที่ไอออนของคลอรีน (Cl<sup>-</sup>) หรือ ไอออนของโบรมีน (Br<sup>-</sup>) เป็นสารที่ถูกเติมลงในน้ำเพื่อการฆ่าเชื้อโรค โดยการเกิดกรดฮาโลอะซีติกนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำที่เข้าสู่ระบบ ทั้งปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ ปริมาณแอมโมเนีย และอัลคาไลนิตี้ เป็นต้น รวมทั้งสภาวะในการเดินระบบ เช่น ปริมาณสารฆ่าเชื้อโรค เวลาสัมผัส การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกก่อนที่จะถึงจุดที่ทำการฆ่าเชื้อโรค หรือการเติมสารฆ่าเชื้อโรคก่อน

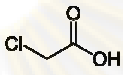
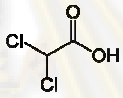
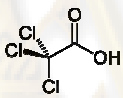
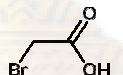
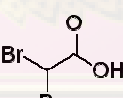
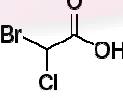
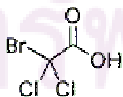
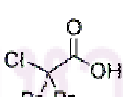
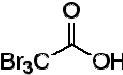
การเกิดกรดฮาโลอะซีติกสามารถพบได้ เมื่อน้ำดื่มมีการเติมคลอรีนภายใต้สภาวะพีเอชเป็นกรดเล็กน้อย และมีความเข้มข้นของโบรมีนต่ำ ความเข้มข้นของ กรดไดคลอโรอะซีติก และ กรดไตรคลอโรอะซีติก จะใกล้เคียงกับความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม และความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกทั้งหมดจะมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นของ ไตรฮาโลมีเทน ในน้ำที่ได้จากกระบวนการขั้นสุดท้าย

##### 2.1.2 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮาโลอะซีติก

กรดฮาโลอะซีติก มีทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) กรดโมโนโบรมิอะซีติก (MBAA) กรด

ไดโบรโมอะซิติก (DBAA) กรดไตรโบรโมอะซิติก (TBAA) กรดโบรโมไดคลอโรอะซิติก (BDCAA) กรดไดโบรโมคลอโรอะซิติก (DBCAA) และ กรดโบรโมคลอโรอะซิติก (BCAA)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮาโลอะซิติกชนิดต่างๆ

ชื่อกรดฮาโลอะซิติก	สูตรโครงสร้าง	น้ำหนัก โมเลกุล (g/mol)	pK <sub>a</sub>	จุดเดือด (°C)
Monochloroacetic acid (MCAA)		94.5	2.87	187.8
Dichloroacetic acid (DCAA)		128.9	1.25	194
Trichloroacetic acid (TCAA)		163.4	0.77	196
Monobromoacetic acid (MBAA)		138.95	2.90	157
Dibromoacetic acid (DBAA)		217.85	1.47	128-130
Bromochloroacetic acid (BCAA)		173.36	1.39	210-212
Bromodichloroacetic acid (BDCAA)		252.26	1.09	-
Dibromochloroacetic acid (DBCAA)		207.81	1.09	-
Tribromoacetic acid (TBAA)		296.74	2.10	245

ซึ่งลักษณะของสารประกอบที่แตกต่างกันนี้ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในน้ำ และปริมาณของสารฆ่าเชื้อโรคที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮาโลอะซิติกชนิดต่างๆ

## 2.2 เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต

ของแข็งอนินทรีย์ที่มีรูพรุนเริ่มมีการนำมาใช้เป็นสารดูดซับ และถูกเร่งปฏิกิริยาให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งวัสดุอนินทรีย์ที่มีรูพรุนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ( $< 2$  นาโนเมตร) วัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 นาโนเมตร) และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ( $> 50$  นาโนเมตร) อย่างไรก็ตาม วัสดุ 2 ชนิดที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในงานดูดซับคือวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เช่น ซีโอไลต์ และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง เช่น MCM-41 และ HMS เป็นต้น ข้อดีของวัสดุจำพวกนี้ที่เห็นได้ชัดคือโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะยอมให้โมเลกุลผ่านเข้าไปยังพื้นผิวภายในและช่องว่างซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้ อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับสูง

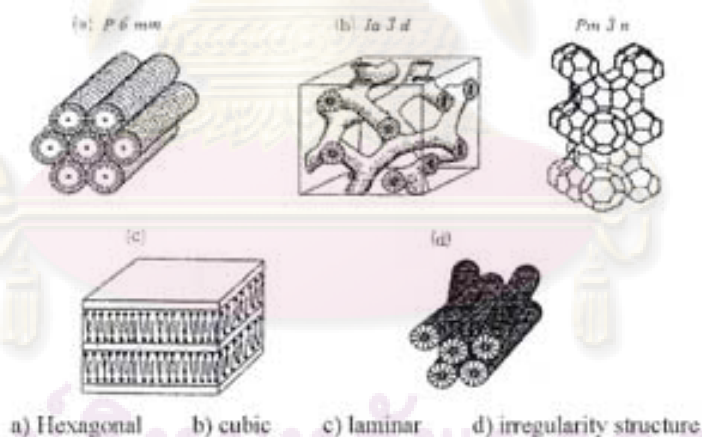
แนวความคิดในการใช้ปรากฏการณ์รวมตัวของสารลดแรงตึงผิวเป็นเทมเพลต (template) เพื่อสร้างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางและคะตะลิสต์ อาจถูกเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น เช่น การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีสมบัติในการคัดเลือกรูปร่างสูง คือ ZSM-5 ในปี 1970 ทั้ง 2 กรณีที่มีการควบคุมขนาดรูพรุนและรูปร่าง เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเฉพาะของโมเลกุล อย่างไรก็ตาม ในซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก สารเคมีจะถูกจำกัดให้เป็นโมเลกุลเล็ก โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 12 อังสตรอม นอกจากนี้ หมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่จะเป็นการสร้างวัฏภาคที่สามารถเกิดปฏิกิริยา แต่ก็ถูกจำกัดด้วยเช่นกัน ในปี 1990 ซิลิเกตและอะลูมิโนซิลิเกตที่มีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 15-300 อังสตรอม เริ่มได้รับความสนใจ รูพรุนขนาดใหญ่ของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง ถูกเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ คือ การแพร่ที่รวดเร็วกว่าของสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าซีโอไลต์ และสารที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมฟอสเฟต พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของโมเลกุลที่มีรูพรุนขนาดกลางนั้นเป็นข้อได้เปรียบ เนื่องจากไม่ต้องการทำให้เป็นวัสดุที่เป็นผลึก ข้อจำกัดทางธรรมชาติของสารเคมีขององค์ประกอบอะตอมมีน้อยกว่าในซีโอไลต์มาก ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้การนำไปประยุกต์ใช้ ได้ผลดีมากขึ้น ทั้งในด้านเป็นสารเร่งปฏิกิริยาการแยกและการดูดซับโมเลกุลต่างๆ ซึ่งต่างจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งใช้โมเลกุลสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนประจุเพียงชนิดเดียวหรือโลหะไอออนเป็นโครงสร้าง ซึ่งโมเลกุลที่มีรูพรุนขนาดกลางสามารถสังเคราะห์โดยอาศัยการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวแล้วเรียงตัวเป็นเทมเพลต (template) สำหรับโครงสร้างสามมิติของซิลิเกตเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้สารลดแรงตึงผิว และสามารถเปลี่ยน

ความยาวของโซ่กิ่งได้โดยเติมสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไตรเมทิลเบนซีน และควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆในการสังเคราะห์ สมบัตินี้เป็นผลโดยตรงของความสัมพันธ์ระหว่างการเรียงตัวของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวและสปีชีส์ของซิลิเกตในเฟสสารละลาย

### 2.2.1 ประเภทและโครงสร้างของมีโซพอร์ซิลิเกต

โครงสร้างของมีโซพอร์ซิลิเกตสามารถแยกประเภทได้โดยโครงสร้างผลึก รูปร่าง และขนาดของรูพรุน องค์ประกอบของโครงสร้างและการก่อตัว รูปที่ 3.1 แสดงประเภทและลักษณะของมีโซพอร์ซิลิเกตชนิดต่างๆ 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 <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> -MO <sub>n</sub> (M = Al, Ti, V, B, Mn, Fe, Ga, Zr) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , SnO <sub>2</sub> , HfO <sub>2</sub> , AlPO <sub>4</sub>
formation	Powder, Partical, sphere, etc.



รูปที่ 2.1 ประเภทและลักษณะของมีโซพอร์ซิลิเกตชนิดต่างๆ (Punyapalakul และ Takizawa, 2004 อ้างถึงใน Takeucho, 1999)

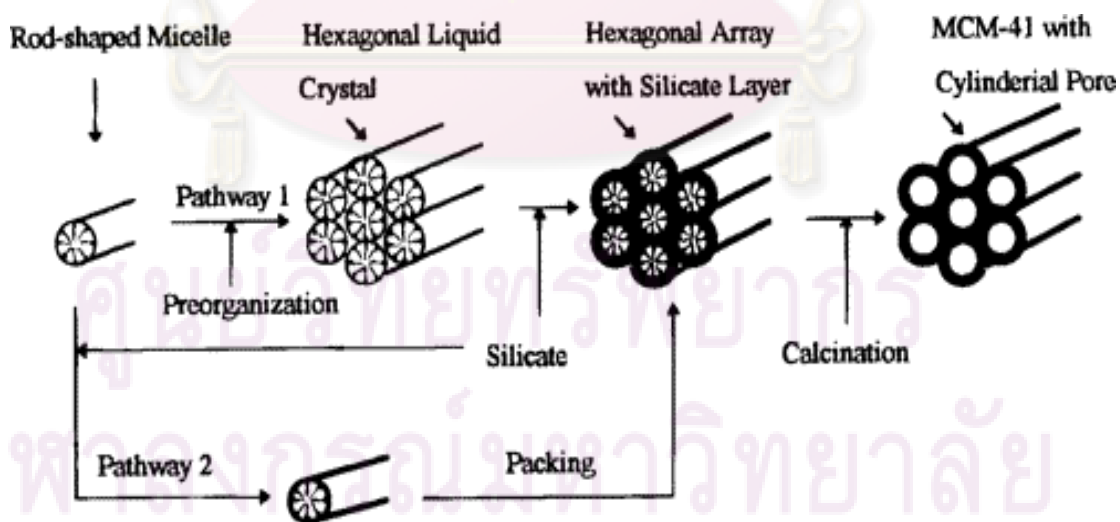
### 2.2.2 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์ซิลิเกต

Tanev และ Pinnavaia (1995) เป็นผู้คิดค้นวิธีการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์ซิลิเกตเป็นอันดับแรก โดย neutral synthesis pathway ( $S^0$ ) ใช้สารอินทรีย์ที่เป็นกลางและสารลดแรงตึงผิวประเภทที่ไม่มีประจุ เช่น เอมีนปฐมภูมิ เป็นสารเคมีที่ใช้ในการ

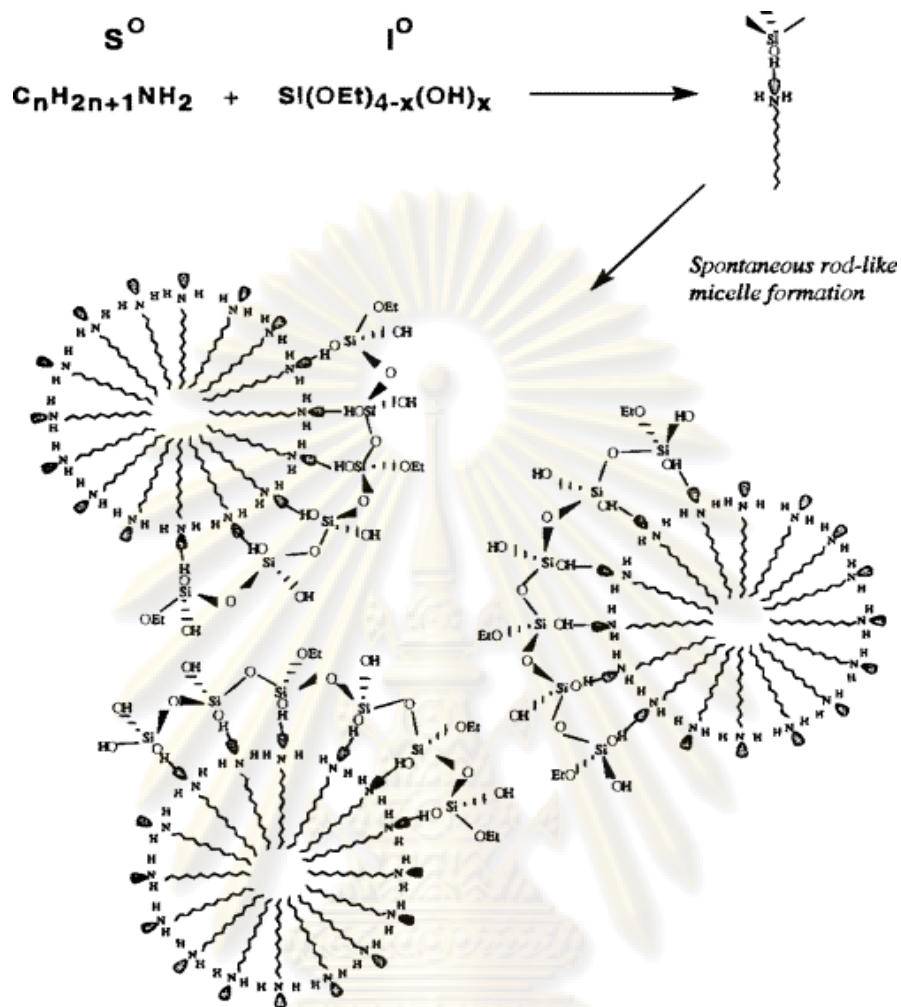
สังเคราะห์ ในกรณีนี้ พันธะไฮโดรเจนค่อนข้างจะมีผลในการสร้างมีโซเฟสแก่สารอินทรีย์ และอินทรีย์มากกว่าอันตรกิริยาจากไฟฟ้าสถิต ในภาวะ  $S^{0,0}$  นี้ จะสร้างโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางที่มีความหนาของผนังมาก และมีการกระจายของขนาดน้อย และองค์ประกอบภายนอกบริเวณของรูพรุนขนาดกลางนี้จะสัมพันธ์กับวัสดุที่ถูกสังเคราะห์ใน pathway อื่น

เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตถูกเตรียมขึ้นโดยใช้  $S^{0,0}$  pathway ในน้ำ ต่อส่วนผสมของตัวทำละลายเอทานอลในตัวกลางปฏิกิริยา ซึ่งเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) เป็นสารเคมีที่ใช้เป็นแหล่งของซิลิกา และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุจะใช้โดเดซิลลามีน (DDA) แน่นอนว่ามีสารเอมีนปฐมภูมิหลายชนิดที่มีการนำมาศึกษาเพื่อสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต แต่โดเดซิลลามีนเป็นสารที่มีการแนะนำมากที่สุด (Tanev และ Pinnavaia, 1995)

เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตนั้นมีวิธีการสังเคราะห์หลายวิธี แต่อย่างไรก็ตามหลังจากที่มีการเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้สังเคราะห์ โดยการศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานแล้ว พบว่ากระบวนการสังเคราะห์ของ Tanev และคณะ (1994) จะเป็นวิธีที่นำมาใช้ เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย และมีเสถียรภาพสูง นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ขนาดของรูพรุน และพื้นที่ผิวของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้ พบว่า อยู่ในช่วง 2.4 – 4.2 นาโนเมตร และ 750 – 1,120 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (Tanev และคณะ, 1994; Gontier และ Tuel, 1995; Mercier และ Pinnavaia, 1997;)



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต (Beck et al., 1992a).



รูปที่ 2.3 กลไกที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตโดยใช้  $S^{\circ}I^{\circ}$  pathway (Tanev and Pinnavaia, 1996)

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต (Tanev และคณะ, 1994)

สารเคมี	อัตราส่วนต่อโมล
เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS)	1
โดเดซิลลามีน (DDA)	0.27
เอทานอล	9.09
น้ำ	29.6



## 2.2.4 การปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์

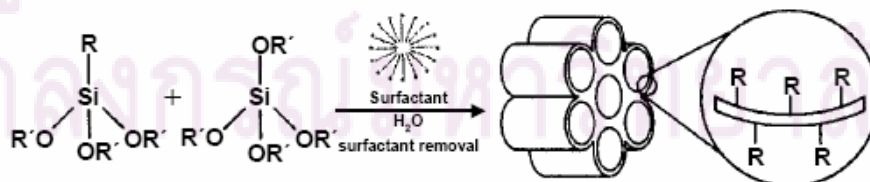
เนื่องจากมีข้อจำกัดในการใช้เฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต เพื่อให้สามารถใช้เฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตได้หลากหลายและจำเพาะเจาะจงมากขึ้น รวมไปถึงการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือในการดูดซับ หรือแลกเปลี่ยนไอออน ฯลฯ จึงมีการคิดค้นวิธีปรับปรุงพื้นผิวของเฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน เป็นวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของเฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมลสารที่ต้องการได้มากขึ้น หรือจำเพาะเจาะจงมากขึ้น โดยทั่วไปการต่อติดหมู่ฟังก์ชันซึ่งเป็นสารอินทรีย์ จะเข้ากับโครงสร้างซิลิโชน อินทรีย์ (Inorganic Siloxane Network) วิธีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันสามารถจำแนกได้ 2 วิธี ได้แก่

### 1) การต่อติดโดยตรงขณะผลึกก่อตัว (Direct co-condensation method)

วิธีการ Direct co-condensation method นั้น เป็นการสังเคราะห์มีไซพอร์สซิลิเกตโดยต่อติดหมู่ฟังก์ชันในขณะเดียวกับขั้นตอนผลึกก่อตัว ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์กับโมเลกุลของสารประกอบซิลิกา และเข้าแทนที่ในโครงสร้างสารประกอบซิลิเกต แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดสารลดแรงตึงผิวไม่สามารถที่จะใช้วิธีเผาด้วยความร้อนสูงได้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ทำการต่อติดไว้จะสูญสลายไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลายแทน เช่น เอทานอล เป็นต้น

### 2) การต่อติดหลังจากกระบวนการสังเคราะห์ (Post-synthesis grafting method)

ส่วนวิธีการต่อติดแบบ Post-synthesis grafting method นั้น จะทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการหลังจากการกำจัดสารลดแรงตึงผิวไปแล้ว ด้วยการเผาที่ความร้อนสูง ซึ่งจะต้องทำการสังเคราะห์ 2 ขั้นตอนแยกจากกัน วิธีนี้จะควบคุมสัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันในกรณีที่ต้องการต่อติด 2 หมู่ฟังก์ชันหรือมากกว่าได้ยาก และปริมาณความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันที่ต่อติดจะมีน้อยกว่ากรณีใช้วิธีต่อติดแบบ Direct co-condensation method



**รูปที่ 2.4** การสังเคราะห์เฮกซะคอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันโดยวิธี Direct co-condensation method (Stein *et al.*, 2000)

## 2.3 การดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการ ออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็ง ซึ่งคือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับนี้ไม่รวมถึงกระบวนการการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสารลดลงไปนั้น เกิดจากกระบวนการดูดซับ กระบวนการโพลิเมอไรเซชัน หรือจากกระบวนการอื่นๆ แล้ว อาจเรียกระบวนการนี้ว่า sorption process

มีการนำเอาการดูดซับไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งในอุตสาหกรรมและงานด้านสิ่งแวดล้อม

สำหรับแรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แรง คือ

1. แรงทางกายภาพ (Physical waal's force) ประกอบด้วย

1) แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน ในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน 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) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

## 2. แรงทางเคมี (chemical force)

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

ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของเหลว นั้น สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate)

### 2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของพลังงาน หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attractive force) อย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอวาล์ว เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับถูกทำให้เกาะติดแน่นอยู่กับโมเลกุลของสารดูดซับ โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหลายๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่บนเนื้อชั้นที่เกิดก่อน โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพนี้ทำให้เกิดส่วนที่หนา และผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพ ขึ้นอยู่กับ

ความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยการคายซับ (desorption) จะสามารถเกิดขึ้นได้

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption) จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับ ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมี ความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้

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

ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

- 1) การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยน หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
- 2) การดูดซับทางกายภาพไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
- 3) ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ค่าที่สำคัญในการพิจารณา
- 4) การดูดซับทางกายภาพ จะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดขึ้นที่ 1 แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
- 5) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว และถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไม่มากนัก พบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น และใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

### 2.3.2 กลไกของการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่สารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าสู่ผิวหน้าสารดูดซับ ขั้นตอนนี้เป็นการส่งมวลของสารที่ถูกดูดซับจากสารละลายไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ หรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ มวลสารที่ถ่ายโอนเป็นไปตามสมการ

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

เมื่อ  $q$  = ปริมาณของสารดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$t$  = ระยะเวลา

$kf$  = mass transfer coefficient (external)

$S$  = พื้นที่ผิวของสารดูดซับ

$c$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย

$c^*$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวหน้าของแข็ง

2) การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ เกิดการถ่ายโอนมวลสารจากมวลสารที่ถูกส่งถ่ายเข้ามาสู่บริเวณพื้นผิวรอบๆ ของสาร แล้วดูดซับเข้าสู่ภายในรูพรุนซึ่งมีพื้นผิวเป็นจำนวนมากสำหรับการดูดซับ

$$\frac{dq}{dt} = K_{av}(q - q^*)$$

เมื่อ  $q^* =$  ปริมาณของสารดูดซับที่สมดุลกับ  $c^*$

$a_v =$  พื้นที่ผิวของสารดูดซับที่เกิดการส่งถ่ายมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ

3) ปฏิริยาพื้นผิว เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละลายได้

ขั้นตอนการดูดซับ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลาย (Adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

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

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

4) การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังสารดูดซับ

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1) ขนาด และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรง กับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

#### 2) ลักษณะของสารถูกดูดซับ

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกดูดซับอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 3) ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

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

#### 4) เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

#### 5) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายนั้นเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และ ไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

### 2.3.4 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับ จะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับ ออกสู่สารละลายจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ จุดนี้เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ณ จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของทั้งระบบ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับหรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็สารที่ถูกดูดซับ สารดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ

#### 2.3.4.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

##### 1) The Pseudo-first-order Model

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอย่างง่าย คือ สมการ Pseudo-first-order แสดงดังสมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

และเมื่อ  $q_t = 0$  ที่เวลา  $t = 0$  และ  $q_t = q_t$  ที่เวลา  $t = t$  จะได้ว่า

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

เมื่อ  $k_1 =$  ค่าคงที่ Lagergren ( $h^{-1}$ )



$q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล  
(mg/g)

$q_t$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่เวลา  $t$  (mg/g)

## 2) The Pseudo-second-order Model

ค่าจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-second-order ใช้อธิบายการดูดซับแบบเคมีที่มีการใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตัวกลางดูดซับและมลสารที่ถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแบบ Pseudo-second-order อาจขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารตัวกลางดูดซับ และปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล สมการของจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-second-order คือ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)^2$$

เมื่อให้  $k_2$  เป็นค่าคงที่ของ จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-second-order และเมื่อกำหนด  $t = 0$  ถึง  $t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t$  สามารถจัดรูปสมการข้างต้นได้ใหม่ดังนี้

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

ข้อได้เปรียบของโมเดลนี้คือ ไม่จำเป็นต้องรู้ความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล นอกจากนี้ อัตราการดูดซับเริ่มต้นสามารถบอกได้จากสมการต่อไปนี้

$$h = k_2q_e^2$$

เมื่อ  $h$  = อัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg/(g.min))

### 2.3.4.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุล เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีหลายรูปแบบ รูปร่างของไอโซเทอร์มของการดูดซับนั้นจะบอกถึงข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้น และบ่งบอกลักษณะการดูดซับของพื้นผิวของสารดูดซับในขณะที่เกิดการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับได้จากการเขียนกราฟระหว่างความสามารถในการดูดซับในสภาวะสมดุล ( $q$ ) กับ ความเข้มข้นสุดท้ายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ( $C_e$ ) ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) คำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่เหลือที่จุดสมดุล (mg/l)

$V$  = ปริมาตรของสารละลาย (l)

$m$  = ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ (g)

ความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มของการดูดซับ สามารถอธิบายได้โดยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งไอโซเทอร์มที่นิยมใช้คือ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ และ ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช

### 1) ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่า

- 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- 2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
- 3) พื้นที่ของบริเวณที่เกิดการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
- 4) พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงได้ดังสมการ

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

เมื่อ  $q_m$  = ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g)

$b$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดติดผิว

ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $1/q$  กับค่า  $1/C_e$  หรือค่า  $C_e/q$  กับค่า  $C_e$

## 2) ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชเป็นไอโซเทอร์มที่ได้รับความนิยมอย่างมาก มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อนำมาอธิบายเกี่ยวกับการดูดซับ มีสมการดังนี้

$$q = k C_e^{(1/n)}$$

เมื่อ  $k$  และ  $n$  = ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิช

ความสัมพันธ์จากไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช เป็นความสัมพันธ์จากสมการอย่างง่าย และสามารถอธิบายถึงการดูดซับในช่วงความเข้มข้นต่ำได้ โดยหากค่า  $1/n$  มีค่าน้อยกว่า 1 จะบอกได้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นไม่ดี แต่ถ้าค่า  $1/n$  มีค่ามากกว่า 1 จะแสดงถึงการดูดซับที่ดี

### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tanev และ คณะ (1996) ทำการสังเคราะห์สารตัวกลางดูดซับได้แก่ MCM-41 และ HMS โดยใช้ pathway ต่างๆ แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ได้พบว่า MCM-41 ซึ่งสารตัวกลางดูดซับที่ใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวก และซิลิกาที่ประจุเป็นลบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกที่ยาว แต่โครงสร้างที่ยาวนี้จะลดลงเมื่อสังเคราะห์ในสภาวะบรรยากาศ ซึ่งโครงสร้างของ MCM-41 จะดีกว่า HMS ที่ใช้สารลดแรงตึงผิวและซิลิกาที่ไม่มีประจุ บอกได้ว่า โครงสร้างและสมบัติของมีซอพอร์สซิลิกาขึ้นอยู่กับ ชนิดและขนาดของสารลดแรงตึงผิว และสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์

Zhao และ Lu (1998) สังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง คือ MCM-41 โดยใช้ไตรเมทิลโคลอโรไซเลน ทำการศึกษาหุ้ฟงักซันบนพื้นผิวด้วย FTIR และทดสอบความสามารถในการดูดซับเบนซีน พบว่า พื้นผิวมีลักษณะของความไม่ชอบน้ำเนื่องมาจากการต่อติดหุ้ฟงักซันกับหุ้ฟงักซันอล ในการทดสอบการดูดซับน้ำแสดงให้เห็นชัดเจนว่าตัวกลางดูดซับ MCM-41 มีลักษณะไม่ชอบน้ำอย่างมาก อย่างไรก็ตามในการดูดซับเบนซีนพบว่า สามารถเกิดขึ้นได้ดี ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะทางเคมีบนพื้นผิวของสารตัวกลางดูดซับ

Xie (2001) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซิติกในน้ำที่มีการเติมคลอรีนเนื่องจากกรดฮาโลอะซิติกส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และในสหรัฐอเมริกาได้มีกฎหมายกำหนดค่ามาตรฐานของกรดฮาโลอะซิติกในน้ำดื่ม ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธี Liquid-liquid microextraction, Acidic methanol derivatization และใช้แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) ในการวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับวิธีตาม EPA Method 552.2 ซึ่งใช้ GC/ECD ในการวิเคราะห์ วิธีที่ใช้ศึกษานี้จะให้เบสไลน์ที่ชัดเจนกว่าและมีพีคบริเวณน้อย ฮาโลอะซิติกแอซิดทั้ง 9 ชนิดมีค่ามาตรฐาน (MDL) น้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการใช้ GC/MS จะลดเวลาในการวิเคราะห์ไปได้โดยไม่มีผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ การศึกษาในอนาคตต้องการวิธีวิเคราะห์หาเบสไลน์ของ GC/MS โดยเฉพาะในการตรวจวัดกรดไตรโบโรอะซิติกและกรดโมโนโคลอโรอะซิติก

Lee และ คณะ (2001) ทำการสังเคราะห์สารตัวกลางดูดซับซิลิเกตที่มีหุ้ฟงักซัน 2 หุ้ คือหุ้เมอร์แคปโตและหุ้อะมิโน เพื่อนำไปกำจัดโลหะหนักในสารละลาย โดยใช้สารเคมีในการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ คือ โดเดซิลามีนและเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ทำการศึกษาผลของหุ้ฟงักซันต่อสมบัติของสารตัวกลางดูดซับ พบว่า ลิแกนด์หุ้อะมิโนจะเพิ่มสมบัติความชอบน้ำแก่สารตัวกลางดูดซับ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับสูงและมีสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับไอออนของปรอทในสารละลายอีกด้วย

Yang (2003) ทำการสังเคราะห์มีไซพอร์ซิลิเกต และปรับปรุงพื้นผิวของ SBA3 และ HMS โดยใช้ 3-aminopropyltriethoxysilane (AM), 3-ethyldiaminopropyltrimethoxysilane (ED) และ 3-piperazinylpropyltriethoxysilane (PZ) พบว่า การเพิ่มปริมาณของหุ้ฟงักซันอินทรีย์ อุณหภูมิ หรือ ความชื้น จะเป็นการช่วยสนับสนุนการต่อติดหุ้ฟงักซันอินทรีย์บนพื้นผิวของมีไซพอร์ซิลิเกต เมื่อสภาวะในการต่อติดหุ้ฟงักซันเป็นสภาวะเดียวกัน ปริมาณหุ้ฟงักซันอินทรีย์บนพื้นผิวของ SBA3 และ HMS สามารถเรียงลำดับได้คือ ED > AM > PZ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของหุ้ฟงักซัน ED ยังใกล้เคียงกับ AM

Punyapalukul และ Takizawa (2004) ทดสอบการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกความเข้มข้นสูง (0-100 มก./ล) บนเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต 5 ชนิด ได้แก่ HMS และปรับปรุงพื้นผิวโดยต่อติดหมู่ฟังก์ชัน 3 ชนิด ได้แก่ 3-aminopropyltriethoxy- (AM-HMS) 3-mercaptoptrimethoxy- (MP-HMS) n-octyldimethyl (OD-HMS) และชนิดที่มีการแทนที่ด้วยไททาเนียม (Ti-HMS) อีกชนิด คือ เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือ หมู่อะมิโน และหมู่เมอร์แคปโต และศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นพบว่า สมบัติทางกายภาพไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก แต่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับนั้นเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบเนื่องจาก สามารถเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต ประจุลบของกรดไดคลอโรอะซิติกจะถูกดูดซับได้เฉพาะเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกตที่เป็นประจุบวก ได้แก่ ตัวกลางดูดซับที่มีหมู่อะมิโน จะทำให้มีความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกสูง ส่วนตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่จะดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกได้สูงเช่นกัน ในขณะที่ประจุบนพื้นผิวดำกว่าตัวกลางดูดซับที่มีหมู่อะมิโนเพียงหมู่เดียว ในช่วงความเข้มข้นของกรดไดคลอโรอะซิติกที่ต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับประจุบนพื้นผิวดังนั้นสารดูดซับที่มีประจุบวกบนพื้นผิวสูงจะดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกได้

Zhao และ คณະ (2005) สังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกต ได้แก่ มีโซพอร์สซิลิเกตที่สกัดสารลดแรงตึงผิวออก และมีโซพอร์สซิลิเกตที่ไม่ได้สกัดสารลดแรงตึงผิวออก ทั้งหมด 3 ชนิด แล้วทดสอบการดูดซับกรด MCAA, DCAA, TCAA, โทลูอิน, แนนทาลีน และเมทิลลอรอนจ์ พบว่าความสามารถในการดูดซับของมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีสารลดแรงตึงผิว สูงกว่ามีโซพอร์สซิลิเกตที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว โดยสารละลายจะสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกตทำให้สามารถดูดซับมลสารได้มากขึ้น ในการดูดซับอาจเป็นได้ว่าเป็นแรงดึงดูดทางประจุ โดยประจุลบของกรดฮาโลอะซิติกถูกดึงดูดไว้ด้วยประจุบวกของสารลดแรงตึงผิวในบริเวณที่มีการรวมกันของสารลดแรงตึงผิวและซิลิกา ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ พบว่า กรด TCAA เหลืออยู่ในสารละลายมากที่สุด รองลงมาคือกรด DCAA และ MCAA ตามลำดับ อาจเพราะความแตกต่างของจำนวนของคลอรีนในโมเลกุล อย่างไรก็ตามมีโซพอร์สซิลิเกตที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว แม้จะถูกสกัดเอาสารลดแรงตึงผิวออกไปแล้ว แต่ก็ไม่สามารถสกัดออกไปได้หมด ทำให้มีสารลดแรงตึงผิวเหลือค้างอยู่ ทำให้มีโซพอร์สซิลิเกตเกิดการดูดซับมลสารได้ โดยแนวโน้มความสามารถในการดูดซับคล้ายกับกรณีมีโซพอร์สซิลิเกตที่มีสารลดแรงตึงผิวอยู่

Punyapalukul และ Takizawa (2006) นำเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต 5 ชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างกัน มาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์มลพิษทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ 2,4-D, เมอร์โคพอพ, 4-คลอโรฟีนอล, โทลูอิน, กรดไดคลอโรอะซิติก และไทโอพลาวิน ที่ ในน้ำเสีย

สังเคราะห์ การเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้แก่เฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต ไม่ได้เพิ่มความสามารถในการดูดซับสารไม่ชอบน้ำเสมอไป การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์จะเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต ซึ่งจะเป็นการเพิ่มแรงค้ำยไฟฟ้าระหว่างตัวกลางดูดซับและสารมลพิษ สารที่มีประจุเป็นลบ ได้แก่ 2,4-D, เมอร์โคพอพ และ กรดไดคลอโรอะซิติกจะถูกดูดซับได้ดีบน AM-HMS ซึ่งเป็นประจุบวกเนื่องจากแรงค้ำยไฟฟ้า พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ทั้ง 2 ปัจจัยร่วมกันนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับของเฮกซะกอนอลมีโซพอร์สซิลิเกต นอกจากนี้แรงค้ำยไฟฟ้าในการดูดซับ ไทโอพลาวิน ที่เกิดเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ สำหรับพื้นผิวที่มีความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำตามลำดับ

Suwat (2006) ศึกษาการกำจัดกรดไดคลอโรอะซิติกโดยใช้มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยกรดไดคลอโรอะซิติกจะอยู่ในช่วงความเข้มข้นต่ำ ทำการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก พบว่า ปัจจัยทางกายภาพไม่มีผลความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่สมบัติความชอบน้ำและแรงทางไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่า มีโซพอร์สซิลิเกตที่ไม่ได้ต่อติดหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่ามีโซพอร์สซิลิเกตชนิดอื่นๆ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ส่วนการต่อติดหมู่เมอร์แคปโตไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $pH_{zpc}$  จึงบอกได้ว่าแรงทางไฟฟ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับ สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิ ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกของ HMS

Babi และ คณะ (2007) ศึกษาการกำจัดกรดฮาโลอะซิติก ไตรฮาโลมีเทน และคาร์บอนที่ละลายได้โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากน้ำดื่มในเมืองเอเธนส์ประเทศกรีซ เวลาในการวิจัยนาน 638 วัน พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดดูดซับคาร์บอนที่ละลายได้มากที่สุด การกำจัดไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติกและคาร์บอนที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่ จะเกิดจากการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ในขณะที่การกำจัดกรดฮาโลอะซิติกและคาร์บอนที่ละลายน้ำได้บางส่วนจะเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพในขั้นการดูดซับ การกำจัดคลอรีนมีสาเหตุมาจากการเร่งในชั้นพื้นผิวของคาร์บอน และการเติบโตของจุลชีพก็มีส่วนช่วยเช่นกัน นอกจากนี้ ถึงปฏิกิริยาที่บรรจุกถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดถึงที่สอง ยังมีประสิทธิภาพมากกว่าครั้งแรก เนื่องจากขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เล็กกว่าและมีอัตราน้ำเข้าที่ต่ำกว่า

Ratasuk และ คณะ (2008) กำจัดกรดฮาโลอะซีติกด้วยไอโซน และถ่านกัมมันต์ชีวภาพ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกเริ่มต้นเท่ากับ 60, 90 และ 120 ppb ติดตั้งถังปฏิกรณ์ของระบบไอโซน และใช้คอลัมน์ในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร วิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซีติกหลังการบำบัดด้วยวิธีของ US EPA Method 552.2 พบว่า กระบวนการบำบัดด้วยไอโซน สามารถกำจัดกรดฮาโลอะซีติกได้เพียง 20% เท่านั้น เมื่อผ่านคอลัมน์เพื่อดูดซับกรดฮาโลอะซีติกด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพ จะสามารถกำจัดกรดฮาโลอะซีติกไปได้มากกว่า 90% ซึ่งการบำบัดด้วยไอโซนจะมีสมบัติการคัดเลือกโดยจะกำจัดได้เพียง กรดโมโนคลอโรอะซีติก และ โมโนโบรโมอะซีติกเท่านั้น โดยเฉพาะกรดไตรคลอโรอะซีติกที่ไม่สามารถกำจัดได้ ซึ่งอาจเพราะจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจน และความเคอะของโครงสร้างของกรดไตรคลอโรอะซีติก แต่ในขณะที่การกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ชีวภาพจะสามารถกำจัดกรดฮาโลอะซีติกได้ทุกชนิดไม่มีสมบัติการคัดเลือก

Ratasuk และ คณะ (2009) ทำการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ใช้เมมเบรน 3 ชนิด ซึ่งมีสมบัติแตกต่างกัน ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮาโลอะซีติกที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 60 ไมโครกรัม/ลิตร และวิเคราะห์หาปริมาณของกรดฮาโลอะซีติกหลังจากการบำบัดด้วยวิธีของ US EPA Method 552.2 การทดลองพบว่า เมมเบรนที่มีสภาพประจุเป็นลบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกสูงสุดได้ถึง 90-100 % เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าที่ผลักกรดฮาโลอะซีติกที่มีไอออนเป็นลบให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ อีกทั้งยังพบว่ากรดไตรคลอโรอะซีติกถูกกำจัดได้น้อยที่สุด อาจเพราะกรดไตรคลอโรอะซีติกมีค่า pKa ต่ำ ทำให้แตกตัวได้มาก สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้มาก กรดไตรคลอโรอะซีติกจึงผ่านเมมเบรนไปได้ เปอร์เซ็นต์การกำจัดกรดไตรคลอโรอะซีติกจึงต่ำที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกที่เข้าระบบ จะทำให้เกิดผลตรงข้าม เนื่องจากจะเกิดการสะสมของกรดฮาโลอะซีติกที่ผิวของเมมเบรน

ศรีสุดา และ วิโรจน์ (2550) สังเคราะห์ตัวกลางดูดซับมีไซพอร์สซิลิเกต และทำการต่อติดหมู่อะมิโนบนพื้นผิว โดยวิธี One-Pot Synthesis และทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ได้ แล้วนำสารตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ไปดูดซับก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ พบว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของสารตัวกลางดูดซับขึ้นอยู่กับความยาวของโซ่เอมีนที่ต่อติดบนพื้นผิว สำหรับการทดสอบการดูดซับนั้น พบว่า สารตัวกลางดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย n-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ดูดซับก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุดเท่ากับ 1,208 มิลลิกรัม/กรัม สามารถบอกได้ว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์

ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารตัวกลางดูดซับได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และจำนวนหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวของสารตัวกลางดูดซับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 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) เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04H)
- 4) เครื่อง UV-VIS Spectrometer (Thermo Electron Corporation, USA)
- 5) เครื่อง Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES (Perkin Elmer : PLASMA-1000)
- 6) เครื่อง Gas Chromatograph, GC/ECD (Agilent GC6890)
- 7) เครื่องวัดพีเอช (Sartorius PB-10)
- 8) เครื่องเขย่า (Labcon)
- 9) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 10) ตู้อบ
- 11) เต้าเผา
- 12) ตู้อบไมโครเวฟ
- 13) ตู้ดูดควัน
- 14) กระดาษกรอง GF/C
- 15) ชุดกรองแบบสุญญากาศ
- 16) ชุดสกัดแบบซอกซ์เฮต
- 17) เม็ดแก้ว
- 18) ไมโครบีเปต
- 19) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)
- 20) เครื่องแก้วที่จำเป็น

## 3.1.2 สารเคมี

- 1) โดเดซิลลามีน ( $C_{12}H_{27}N$ ) (AR Grade, Acros)
- 2) เอทานอล ( $C_2H_6O$ ) (AR Grade, Merck)
- 3) เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ( $SiC_8H_{20}O_4$ ) (AR Grade, Fluka)
- 4) เตตระไอโซโพรพิลออร์โธไททาเนต ( $C_{12}H_{28}O_4Ti$ ) (AR Grade, Acros)
- 5) 1,2,3 ไตรคลอโรโพรเพน ( $C_3H_5Cl_3$ ) (AR Grade, Acros)
- 6) 2,3 ไดโบรโมโพรพิโอนิคแอซิด ( $C_3H_4Br_2O_2$ ) (AR Grade, Fluka)
- 7) 1-เมทิล-2-ไพโรลิโดน ( $C_5H_9NO$ )
- 8) 3-เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอักษีไซเลน ( $C_6H_{16}O_3SSi$ ) (AR Grade, Aldrich)
- 9) 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอักษีไซเลน ( $C_9H_{23}NO_3Si$ ) (AR Grade, Fluka)
- 10) คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ) (AR Grade, Carlo Erba)
- 11) โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส ( $Na_2SO_4$ ) (AR Grade, Carlo Erba)
- 12) เมทิล เทอร์เทียรี บิวทิล อีเทอร์ ( $C_5H_{12}O$ ) (HPLC Grade, Lab Scan Analytical Sciences)
- 13) เมทานอล ( $CH_3OH$ ) (AR Grade, Merck)
- 14) กรดบอริก ( $B(OH)_3$ ) (AR Grade, J.T. Baker)
- 15) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) (AR Grade, J.T. Baker)
- 16) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (AR Grade, UNILAB)
- 17) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (AR Grade, UNILAB)
- 18) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) (AR Grade, J.T. Baker)
- 19) โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) (AR Grade, UNILAB)
- 20) โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ ) (AR Grade, Fluka)
- 21) กรดไนตริก ( $HNO_3$ ) (AR Grade, J.T. Baker)
- 22) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) (AR Grade, Fluka)
- 23) ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต ( $K_2HPO_4$ ) (AR Grade, Carlo Erba)
- 24) โพแทสเซียมไดฟอสเฟต ( $KH_2PO_4$ ) (AR Grade, Carlo Erba)
- 25) กรดโมโนคลอโรอะซิติก ( $C_2H_3ClO_2$ ) (AR Grade, Merck)
- 26) กรดไดคลอโรอะซิติก ( $CHCl_2COOH$ ) (AR Grade, Acros)
- 27) กรดไตรคลอโรอะซิติก ( $CCl_3COOH$ ) (AR Grade, Merck)

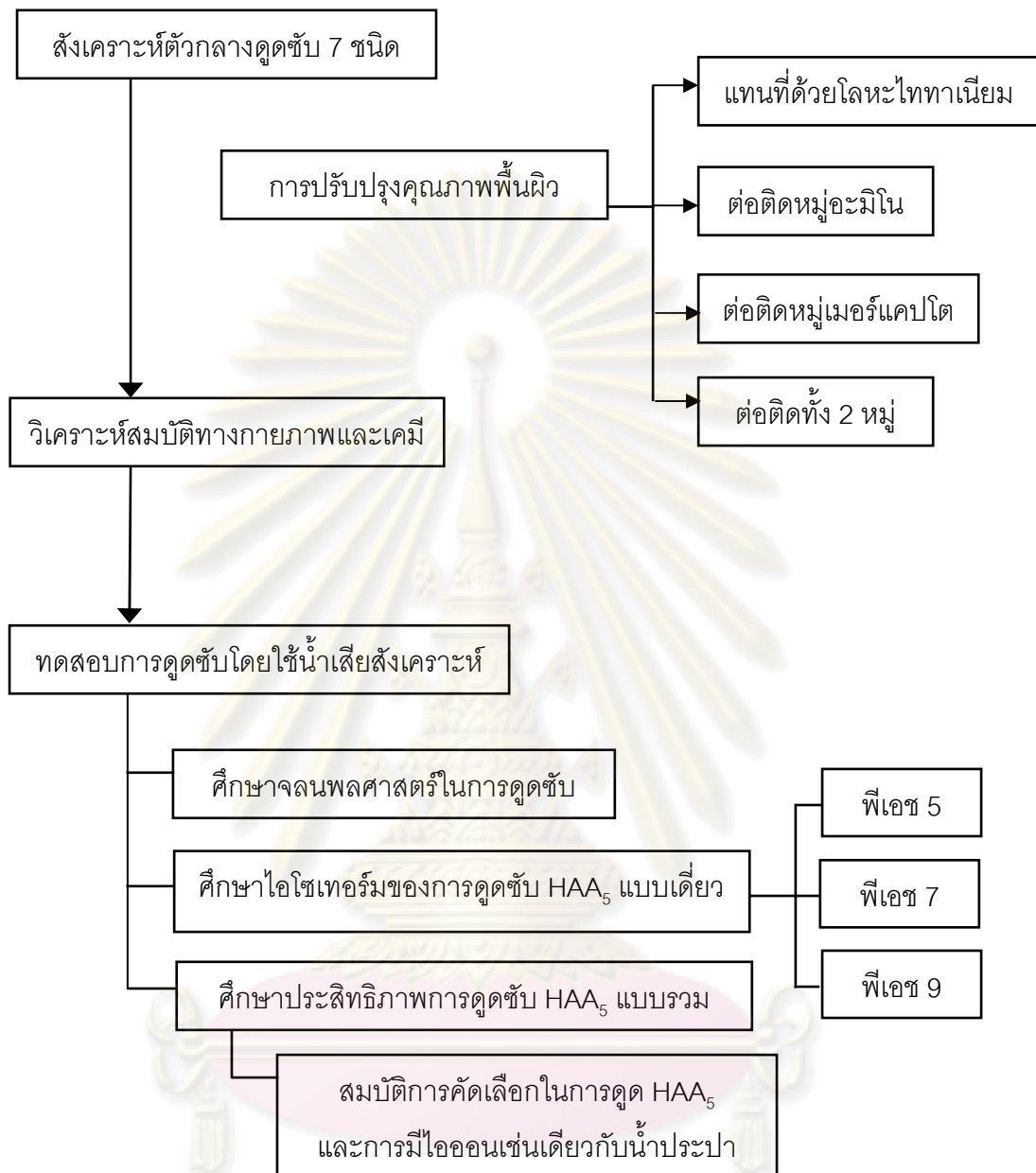
- 28) กรดโมโนโบรโมอะซิติก ( $C_2H_3BrO_2$ )
- 28) กรดไดโบรโมอะซิติก ( $Br_2CHCOOH$ ) (AR Grade, Aldrich)
- 30) น้ำกลั่น (Distilled water)
- 31) น้ำดีไอออไนซ์ (Deionized water)
- 32) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง Shirasagi S-10 (Japan EnviroChemicals Ltd.)
- 33) น้ำประปา

### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการสังเคราะห์ตัวกลาง ดูดซับทั้งหมด 7 ชนิด จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของ ตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอร์มของการดูดซับโดย ใช้น้ำเสียสังเคราะห์

การปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันได้แก่ หมู่อะมิโน และหมู่เมอร์แคปโต ซึ่งต่อติดแบบหมู่ฟังก์ชันเดี่ยว และแบบ 2 หมู่ฟังก์ชัน จากนั้นจะทำการศึกษา เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอร์ม ในการดูดซับเช่นเดียวกัน

ในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ ทำโดยการทดลองแบบทีละเท (Batch) โดยใช้น้ำ เสียสังเคราะห์ โดยศึกษากรดฮาโลอะซิติก 5 ชนิด ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) กรด ไดคลอโรอะซิติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA) กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA) ทำการทดลองแยกเป็น 2 กรณี คือ ทดสอบประสิทธิภาพแบบเดี่ยว และ ทดสอบประสิทธิภาพแบบรวม โดยควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ พีเอช และความ เข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง



รูปที่ 3.1 แผนการทดลองในการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

#### 3.2.1.1 การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซฟอรัสซิลิเกต (Hexagonal Mesoporous Silicate, HMS) (Punyapalukul P. and Takizawa S., 2004)

ในการสังเคราะห์ ปฏิริยาที่เกิดขึ้นจะมีการใช้พันธะไฮโดรเจนและการรวมตัวระหว่างสารเอมีนปฐมภูมิและสารอนินทรีย์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น คือ โดเดซิลามีน และเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดผลึก และเป็นแหล่งของซิลิกา ตามลำดับ

นอกจากนี้ ยังมีการใช้เอทานอล เป็นตัวทำลายร่วมตามอัตราส่วนต่างๆ วิธีการสังเคราะห์ (Tanev และคณะ, 1995) มีดังนี้

- 1) ผสมโดเดซิลามีนจำนวน 0.27 โมล เอทานอลจำนวน 9.09 โมล และน้ำจำนวน 29.6 โมล โดยการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 2) แล้วเติมเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตจำนวน 1 โมล ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา ในสภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- 3) นำไปกรอง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์อื่นๆ

### 3.2.1.2 การปรับปรุงพื้นผิวโดยการแทนที่ด้วยไททาเนียม(Ti-HMS) (Punyapalukul P., 2004)

เฮกซะกอนอลมีโซพอร์ซิลิเกต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวโดยการแทนที่ด้วยโลหะไททาเนียม (Ti-HMS) สังเคราะห์ได้เช่นเดียวกับการสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีโซพอร์ซิลิเกต (HMS) แต่จะมีการเติมไททาเนียมลงไป สารเคมีที่ใช้คือ เตตระไอโซโพรพิลออร์โธไททานेट ผสมกับเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตในอัตราส่วน 100 ต่อ 1 แล้วจึงนำส่วนผสมนั้นไปผสมกับโดเดซิลามีน น้ำและเอทานอล ขั้นตอนในการสังเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- 1) ผสมโดเดซิลามีนจำนวน 0.27 โมล เอทานอลจำนวน 9.09 โมล และน้ำจำนวน 29.6 โมล โดยการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 2) จากนั้นจึงเติมเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตจำนวน 1 โมล และเตตระไอโซโพรพิลออร์โธไททานेटจำนวน 0.01 โมล ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา ในสภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- 3) นำไปกรอง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์อื่นๆ

### 3.2.1.3 การปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์

#### 3.2.1.3.1 การต่อติดด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane (Punyapalukul P. and Takizawa S., 2004)

การเพิ่มหมู่อะมิโนให้แก่ เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต โดยการต่อติดด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane จะเป็นการเพิ่มสมบัติความชอบน้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ วิธีการสังเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- 1) ผสมโดเดซิลามีนจำนวน 0.25 โมล เอทานอลจำนวน 10.25 โมล และน้ำจำนวน 50 โมล โดยการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 2) เติมนเตรอะเททริเอทออร์โธซิลิเกตจำนวน 1 โมล ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที แล้วเติม 3-aminopropyltriethoxysilane ดังอัตราส่วนในตารางที่ 3.1
- 3) ปั่นกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 20 ชั่วโมง

### 3.2.1.3.2 การต่อติดด้วย 3-mercaptopropyltrimethoxysilane (Punyapalaku P. and Takizawa S., 2004)

การเพิ่มหมู่อะมิโนให้แก่ เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกต โดยการต่อติดด้วย 3-mercaptopropyltrimethoxysilane จะเป็นการเพิ่มสมบัติความชอบไม่น้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ วิธีการสังเคราะห์มีดังนี้

- 1) ผสมโดเดซิลามีนจำนวน 0.25 โมล เอทานอลจำนวน 10.25 โมล และน้ำจำนวน 50 โมล โดยการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
  - 2) เติมนเตรอะเททริเอทออร์โธซิลิเกตจำนวน 1 โมล ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที แล้วเติม 3-mercaptopropyltrimethoxysilane ดังอัตราส่วนในตารางที่ 3.1
  - 3) ปั่นกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 20 ชั่วโมง
  - 4) นำไปกรอง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- จากนั้นจึงนำไปสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตเพื่อกำจัดสาร organosilane และสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

### 3.2.1.3.3 การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ 2 หมู่ (Punyapalaku P. and Takizawa S., 2004)

การสังเคราะห์เฮกซะกอนอลมีไซพอร์สซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (Lee และคณะ , 2001) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ผสมโดเดซิลามีนจำนวน 0.25 โมล เอทานอลจำนวน 10.25 โมล และน้ำจำนวน 50 โมล โดยการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที

- 2) เติมเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตจำนวน 1 โมล ปั่นจนต่อเป็นเวลา 30 นาที แล้วเติม 3-aminopropyltriethoxysilane และ 3-mercaptopropyltrimethoxysilane ดังอัตราส่วนในตารางที่ 3.1
- 3) ปั่นจนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 20 ชั่วโมง
- 4) นำไปกรอง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปสกัดด้วยวิธีซอกซ์ฮัทเพื่อกำจัดสาร organosilane และสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

**ตารางที่ 3.1** อัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์มีโซพอร์ซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์

สารเคมี (Molar ratio)	A-HMS	A7M3	A5M5	A3M7	M-HMS
3-aminopropyltriethoxysilane	0.25	0.175	0.125	0.075	-
3-mercaptopropyltrimethoxysilane	-	0.075	0.125	0.175	0.25

### 3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

#### 3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) Diffractometer; Bruker AXS Model D8 ที่ scanning rate 1,000 deg min<sup>-1</sup> ในช่วง 0.35<sup>o</sup> – 6.0<sup>o</sup> (2θ)

#### 3.2.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน

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

วิธีการคือ ใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติ ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุ

ไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมานอมิเตอร์ โดยมีวิธีการดังนี้

1. อบตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 0.02-0.05 กรัม ใส่ลงใน Adsorption Vessel
  2. วางเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างไว้ลงใน Heating Thermostat
  3. ชั่งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนธรรมดาที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด
  4. ใช้เซลล์ 2 เซลล์ ที่มีปริมาตรเท่ากันโดยเซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์เปล่า
  5. ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในเซลล์ทั้งสอง ภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง
  6. ทำให้เซลล์ทั้งสองเย็นจัดใน Cold Bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิด Pressure Difference ระหว่างเซลล์ทั้งสองซึ่งวัดได้โดยใช้ Differential Monometer
  7. อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวต่อไป
- พื้นที่ผิวจำเพาะคำนวณโดยใช้ข้อมูลการดูดซับในช่วงความดันสัมพัทธ์ ตั้งแต่ 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  $V$  = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวรูป  
พูน ( $\text{cm}^3$ )

$V_m$  = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวรูป  
พูนแบบโมเลกุลชั้นเดียว (Mono-molecule  
Layer) ปกคลุมทั่วผิวรูปพูน ( $\text{cm}^3$ )



- $P$  = 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  $E_1$  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 ดังรูปที่ 3.2 จากความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้ค่าที่อยู่ในช่วง  $0.05 < P / P_0 < 0.35$



**รูปที่ 3.2** กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนและความดันสัมพัทธ์ จากสมการของ BET (Suwat, 2006)

เมื่อ  $V_m$  และ  $c$  เป็นค่าที่ได้จากสมการของ BET จากรูปที่ 3.2 ค่าที่ได้จาก ความชัน ( $A$ ) และจุดตัดแกน  $Y$  ( $I$ ) สามารถนำไปคำนวณปริมาณในการดูดซับก๊าซในชั้นที่หนึ่งได้จากสมการ

$$V_m = \frac{1}{A+I}$$

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

$V_m$  มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยตารางเมตรต่อกรัม ได้จากสมการ

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

เมื่อ  $S$  = พื้นที่ผิวจำเพาะ

$N_0$  = เลขอวกาโดร

$m$  = ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊ส

$$(N_2 = 16.2 \text{ \AA}^2)$$

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

$$\ln \frac{p_0}{p} = \frac{2\gamma V_L}{rRT}$$

เมื่อ  $p_0$  = ความดันไออิ่มตัว

$p$  = ความดันที่สภาวะสมดุล

$V_L$  = ปริมาตรของของเหลว

$\gamma$  = ความเครียดของพื้นผิว

ถ้ารัศมีของรูพรุนน้อยกว่าค่า  $r$  จะถูกเติมด้วยไอควบแน่น โดยปกติแล้ว การดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิด การควบแน่นแบบแคปิลลารีในรูพรุนร่วมด้วย ดังนั้นสมการ Kelvin จะไม่ให้รัศมีของรูพรุนที่ถูกต้อง เพราะขนาดของรูพรุนจะลดลงเนื่องจากความหนาของชั้นของสารดูดซับ ดังนั้น จึงต้องมีการคิดค่าการควบแน่นแคปิลลารีที่ความดันใดๆ จากสมการ

$$r_p = \frac{2\gamma V_L}{RT \ln p_0/p} + t$$

เมื่อ  $t =$  ความหนาของชั้นของสารดูดซับ

ความหนาสามารถประมาณได้อย่างแม่นยำโดยสมการของ harkins-Jura ในช่วงความดันสัมพัทธ์เท่ากับ 0.1 – 0.95 ดังสมการ

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

### 3.2.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy Nicolet Impact 410 โดยใช้ KBr ในการเตรียมตัวอย่าง โดยจะนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเพื่อลดผลกระทบจากการรบกวนที่เกิดจากความชื้นก่อนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

สำหรับมีโซพอร์สซิลิเกต ในการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี จะใช้ช่วงสเปกตรัม 400 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่พบในการวิเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกต แสดงดังตารางที่ 3.4 นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ใช้ในการต่อติด เพื่อปรับปรุงมีโซพอร์สซิลิเกตอีกด้วย

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในมีโซพอร์สซิลิเกต

หมู่ฟังก์ชัน	IR spectra bands (cm <sup>-1</sup> )	อ้างอิง
O-Si-O	470	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Si-O	1100	Roy และคณะ, 1996; Carrado และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 1999
Ring structure of SiO <sub>4</sub>	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 <sub>2</sub> O	1650-1600	Roy และคณะ, 1996; Decottignies และคณะ, 1978
O-H	3750	Parfitt และคณะ, 1985
CH <sub>3</sub> of ethoxy group	2970	Brunel และคณะ, 1995
-CH <sub>2</sub> - 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

#### 3.2.2.4 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน (Soonglerdsongpha S., 2006)

ปริมาณไนโตรเจน สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคการดูดซับอัลตราไวโอเล็ต (UV Adsorption Technique) ตัวกลางดูดซับจะถูกย่อยโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) ในสภาวะที่เป็นเบส โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- 1) เติมนิโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) จำนวน 3 กรัม ลงในสารละลายที่มีไฮเดรอกไซด์ 4 กรัม จำนวน 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้ง

- 2) สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจน/มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐาน เตรียมโดย เติม  $\text{KNO}_3$  ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.722 กรัม ละลายด้วย น้ำดีไอออนซ์ แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
- 3) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (1+500) เตรียมโดยผสมกรด ไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในน้ำดีไอออนซ์จำนวน 500 มิลลิลิตร และสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก (1+16) เตรียมโดยผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในน้ำดี ไอออนซ์จำนวน 16 มิลลิลิตร
- 4) วิเคราะห์โดยนำตัวอย่างดูดซับจำนวน 50 มิลลิกรัม ใส่ในขวด แก้ว แล้วเติมน้ำดีไอออนซ์จำนวน 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายผสมในข้อ 1 จำนวน 10 มิลลิลิตร ย่อยในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- 5) จากนั้นนำตัวอย่างไปกรอง เก็บส่วนที่กรองได้จำนวน 25 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (1+16) จำนวน 5 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอชให้ได้ ประมาณ 2-3 แล้วนำตัวอย่างใส่ลงในหลอด colorimetric ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 6) เจือจางตัวอย่างด้วยน้ำดีไอออนซ์จนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 นาโน เมตร
- 7) ทำแบลนด์โดยเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (1+500) จำนวน 5 มิลลิลิตร ลงในน้ำดีไอออนซ์ แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร จากนั้นจึงนำไปวัด ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer เช่นเดียวกัน
- 8) การสร้างกราฟมาตรฐานสามารถทำได้ โดยใช้สารละลายในข้อ 2 จำนวน 10 มิลลิลิตร แล้วเจือจาง 10 ครั้ง โดยใช้ปริมาตรเท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ สารละลาย 1-15 มิลลิลิตร ที่เหลืออยู่ซึ่งเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมไนโตรเจน/มิลลิลิตร เทใส่ลงใน หลอด colorimetric แต่ละหลอด แล้วเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (1+500) จำนวน 5 มิลลิลิตร ลงทุกหลอด ปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอออนซ์ จากนั้นจึงนำไปวัดด้วย เครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 นาโนเมตร

ข้อมูลที่ได้จะถูกเขียนเป็นกราฟระหว่างค่าปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด กับค่า UV-adsorbance ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในหน่วยมิลลิกรัม/กรัม สามารถคำนวณได้ดังสมการ

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

เมื่อ a คือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน และ b คือ ปริมาณของสารตัวอย่าง

### 3.2.2.5 การวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ (Suwat, 2006)

ปริมาณของซัลเฟอร์วิเคราะห์โดยเครื่อง Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) โดยนำสารตัวกลางดูดซับไปย่อยในตู้ไมโครเวฟ โดยใช้สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 65% จำนวน 7 มิลลิลิตร และ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 40% จำนวน 2 มิลลิลิตร ตั้งค่าอุณหภูมิเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และตั้งเวลาให้รอไว้ 20 นาที หลังจากนั้น ให้นำเยื่อจนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง กรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกำจัดโดยเติมกรดบอริกเข้มข้น 5% จำนวน 10 มิลลิลิตรก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-AES

### 3.2.2.6 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว

วิเคราะห์โดยการไทเทรตกรด-เบส โดยใช้สารผสมของสารตัวกลางดูดซับเข้มข้น 2 กรัม/ลิตร จำนวน 20 มิลลิลิตร แปลงค่าปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่จะเติมลงไปในแต่ละสารผสมของสารตัวกลางดูดซับเพื่อแปลงค่าพีเอชให้ต่างกัน โดยมี 1 ตัวอย่างที่ไม่มีการเติมกรดหรือเบสลงไป แต่ละตัวอย่างจะถูกเจือจางด้วยน้ำดีไอออนไนซ์ให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 25 มิลลิลิตร จากนั้นจึงปรับค่า Ionic Strength ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ แล้วนำตัวอย่างไปเขย่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าประจุบนพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากพีเอชของตัวอย่างที่วัดได้หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุล

หลักการของการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า จะต้องใช้ค่าจากจุดทุกจุดที่ได้จากกราฟของการไทเทรต โดยผลรวมของประจุลบเท่ากับผลรวมของประจุบวก (Schultheness และ Spark, 1986) ดังสมการ

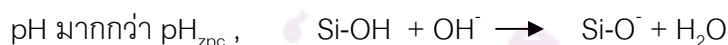
ผลรวมของประจุบวก = ผลรวมของประจุลบ

การไทเทรตจะควบคุมให้ค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุล จะทำการวัดพีเอชของสารละลายและเขียนเป็นกราฟระหว่างค่าพีเอชและประจุบนพื้นผิว ซึ่งได้จากการคำนวณดังสมการ

$$\text{Surface charge (C/g)} = \{[\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}} - [\text{H}^+] + [\text{OH}^-]\} \times 96500 / W$$

เมื่อ	$[\text{HCl}]_{\text{add}}$	=	ความเข้มข้นของ HCl ที่เติม (mol/l)
	$[\text{NaOH}]_{\text{add}}$	=	ความเข้มข้นของ NaCl ที่เติม (mol/l)
	$[\text{H}^+]$	=	ความเข้มข้นของโปรตอนไฮดรอกไซด์ไอออน (mol/l) คำนวณได้จาก $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$
	$[\text{OH}^-]$	=	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (mol/l) คำนวณได้จาก $\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$ และ $\text{pOH} = 14 - \text{pH}$
	96500	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C/mol)
	W	=	น้ำหนักของสารตัวกลางดูดซับ (g/l)

หมู่ไฮดรอกซิลจะแสดงบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นซิลิเกต ซึ่งโปรตอนสามารถเพิ่มหรือลดไปได้ ผลของประจุบนพื้นผิวจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ที่พีเอชต่ำพื้นผิวจะมีการเพิ่มโปรตอน และจะกลายเป็นประจุบวก และที่พีเอชสูงโปรตอนจะหายไป ทำให้พื้นผิวเป็นประจุลบ



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

### 3.2.3 การศึกษาการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

#### 3.2.3.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกรดฮาโลอะซิติกบนพื้นผิวของตัวกลาง

##### ดูดซับ

- 1) ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้ว 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีน้ำตัวอย่างที่มีกรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) เข้มข้น 100 µg/l จำนวน 25 มิลลิลิตร ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร โดยจำนวนตัวอย่างในการศึกษาจลนพลศาสตร์แปรผันตามระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาดังข้อ 3
- 2) นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 25±2 องศาเซลเซียส
- 3) เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 240 นาที และจากนั้นเก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง โดยกรองเอา HMS ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ US EPA Method 552.2
- 4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่าง เป็นกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA), กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA), กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA)
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5



ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกรดฮาโลอะซีติกบนพื้นผิวของสารตัวกลาง  
ดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- เวลา</li> <li>- ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ชนิดของกรดฮาโลอะซีติก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0, 10, 30, 60, 120, 240 จากนั้นเก็บตัวอย่าง ทุกๆ 2 ชั่วโมง</li> <li>- HMS, Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง</li> <li>- กรด MCAA, DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA</li> </ul>
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของ HAA<sub>5</sub> ที่สภาวะสมดุล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วิธีของ US EPA Method 552.2</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช</li> <li>- ค่า ionic strength</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ปริมาตรสารละลาย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์</li> <li>- ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร</li> <li>- 25 ± 2 องศาเซลเซียส</li> <li>- 0.05 กรัม</li> <li>- ปริมาตร 25 มิลลิลิตร</li> </ul>

### 3.2.3.2 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

- 1) เตรียมน้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำกลั่นที่มี กรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) เข้มข้น 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300  $\mu\text{g/l}$
- 2) ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มี กรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 25 มิลลิลิตร ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
- 3) กรองเอา HMS ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ US EPA Method 552.2
- 4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็น กรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA), กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA), กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA)
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก</li> <li>- ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ชนิดของกรดฮาโลอะซีติก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 <math>\mu\text{g/l}</math></li> <li>- HMS, Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง</li> <li>- กรด MCAA, DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA</li> </ul>
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของ <math>\text{HAA}_5</math> ที่สภาวะสมดุล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วิธีของ US EPA Method 552.2</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช</li> <li>- ค่า ionic strength</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- ปริมาณตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ปริมาตรของสารละลาย</li> <li>- ระยะเวลาในการเขย่า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์</li> <li>- ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร</li> <li>- <math>25 \pm 2</math> องศาเซลเซียส</li> <li>- 0.05 กรัม</li> <li>- 25 มิลลิลิตร</li> <li>- ได้จากการทดลองข้อ 3.2.3.1</li> </ul>

### 3.2.3.3 การศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

1) เตรียมน้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำกลั่นที่มีกรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) เข้มข้น 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 µg/l

2) ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ กรดฮาโลอะซิติก ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 25 มิลลิลิตร แปลงค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.3.1

3) กรองเอา HMS ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ US EPA Method 552.2

4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็นกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA), กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA), กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA)

5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก</li> <li>- พีเอชของสารละลายตัวอย่าง</li> <li>- ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ชนิดของกรดฮาโลอะซีติก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 µg/l</li> <li>- 5, 7 และ 9</li> <li>- HMS, Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง</li> <li>- กรด MCAA, DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA</li> </ul>
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของ HAA<sub>5</sub> ที่สภาวะสมดุล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วิธีของ US EPA Method 552.2</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่า ionic strength</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ปริมาตรสารละลาย</li> <li>- ระยะเวลาในการเขย่า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร</li> <li>- 25 ±2 องศาเซลเซียส</li> <li>- 0.05 กรัม</li> <li>- 25 มิลลิลิตร</li> <li>- ได้จากการทดลองข้อ 3.2.3.1</li> </ul>

### 3.2.3.4 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับ

#### 3.2.3.4.1 ใช้น้ำกลั่นโดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

- 1) เตรียมน้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำกลั่น ที่มีสารละลายผสมของ กรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA), กรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA), กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA), กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA) เข้มข้น 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 µg/l
- 2) ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำตัวอย่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 25 มิลลิลิตร ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และควบคุม ionic strength ให้เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
- 3) กรองเอา HMS ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C นำสารละลายที่ได้จากการกรอง ไปสกัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ US EPA Method 552.2
- 4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนสารตัวกลางดูดซับเป็น Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อใช้น้ำกลั่นและควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก</li> <li>- ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ชนิดของกรดฮาโลอะซีติก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 µg/l</li> <li>- HMS, Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง</li> <li>- กรด MCAA, DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA</li> </ul>
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของ HAA<sub>5</sub> ที่สภาวะสมดุล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วิธีของ US EPA Method 552.2</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช</li> <li>- ค่า ionic strength</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ปริมาตรสารละลาย</li> <li>- ระยะเวลาในการเขย่า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์</li> <li>- ionic strength เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร</li> <li>- 25 ± 2 องศาเซลเซียส</li> <li>- 0.05 กรัม</li> <li>- 25 มิลลิลิตร</li> <li>- ได้จากการทดลองข้อ 3.2.3.1</li> </ul>

### 3.2.3.4.2 ใช้น้ำประปา

- 1) วิเคราะห์หาปริมาณของกรดฮาโลอะซีติก ( $HAA_5$ ) ด้วย Gas Chromatograph (GC/ECD)
- 2) เตรียมน้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำประปาที่มีสารละลายผสมของกรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA), กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA), กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA), กรดโมโนโบรโมอะซีติก (MBAA) และ กรดไดโบรโมอะซีติก (DBAA) เข้มข้น 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300  $\mu\text{g/l}$
- 3) ชั่ง HMS ที่อบแห้งแล้วมา 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำตัวอย่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 25 มิลลิลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
- 4) กรองเอา HMS ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปสกัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/ECD) ตามวิธีของ US EPA Method 552.2
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนสารตัวกลางดูดซับเป็น Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5



ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อใช้น้ำประปา

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก</li> <li>- ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ชนิดของกรดฮาโลอะซีติก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0, 25, 50, 75, 100, 200 และ 300 µg/l</li> <li>- HMS, Ti-HMS, M-HMS, A-HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และถ่านกัมมันต์ชนิดผง</li> <li>- กรด MCAA, DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA</li> </ul>
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของ HAA<sub>5</sub> ที่สภาวะสมดุล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วิธีของ US EPA Method 552.2</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ</li> <li>- ระยะเวลาในการเขย่า</li> <li>- ปริมาตรสารละลาย</li> <li>- ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์</li> <li>- 25 ± 2 องศาเซลเซียส</li> <li>- 0.05 กรัม</li> <li>- ได้จากการทดลองข้อ 3.2.3.1</li> <li>- 25 มิลลิลิตร</li> <li>- ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในน้ำประปา</li> </ul>

### 3.2.4 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซีติก

ในการวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซีติกทำตามวิธีของ US EPA Method 552.2 ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ 2 ขั้นตอนมีดังนี้

#### 3.2.4.1 ขั้นการสกัด

- 1) นำสารละลายตัวอย่างมาจำนวน 40 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดแก้วขนาด 60 มิลลิลิตร แล้วเติม surrogate standard จำนวน 20 ไมโครลิตร
- 2) ปรับพีเอชให้น้อยกว่า 0.5 ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นอย่างน้อย 2 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเขย่าให้ผสมกันดี แล้วนำไปตรวจสอบพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์
- 3) เติมคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพนตะไฮเดรตจำนวน 2 กรัมอย่างรวดเร็ว เขย่าจนละลายหมด จะได้สารละลายสีฟ้า แล้วจึงเติมโซเดียมซัลเฟตจำนวน 16 กรัมอย่างรวดเร็วเขย่า 3-5 นาที จนละลายหมด
- 4) เติม MTBE จำนวน 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที 250 รอบ/นาที แล้วจึงตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นประมาณ 5 นาที

#### 3.2.4.2 ขั้นเมทิลเลชัน

- 1) บีบ MTBE ที่อยู่ชั้นบนมา 3 มิลลิลิตรใส่ลงใน conical centrifuge tube แล้วเติม 10% กรดซัลฟิวริกในเมทานอล จำนวน 1 มิลลิลิตร
- 2) ปิดฝาหลอดแล้วนำไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำหลอดออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- 3) เติมสารละลายโซเดียมโบรไมด์อิ่มตัวจำนวน 4 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น
- 4) นำสารละลายชั้น MTBE จำนวน 1 มิลลิลิตรใส่ลงใน autosampler vial เติมสารละลาย internal standard จำนวน 10 ไมโครลิตร ลงใน vial แล้วนำตัวอย่างที่สกัดแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/ECD (Agilent GC6890) คอลัมน์ VF-XMS (30 m x 0.32 mm i.d. x 0.05  $\mu$ m film thickness) อุณหภูมิของอินเจคเตอร์เท่ากับ 250 °C ระบบการฉีด

สารตัวอย่างเป็นแบบ splitless mode เท่ากับ 30 วินาที ใช้ก๊าซฮีเลียม และก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาด้วยอัตรา 45 cm/sec ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิของเครื่องเริ่มที่ 35 °C ให้อุณหภูมิตั้งที่ 1 นาที และเพิ่มขึ้นเป็น 80 °C ด้วยอัตรา 2 °C/นาที คงไว้ 10 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 15 °C /นาที จนอุณหภูมิเท่ากับ 200 °C และอุณหภูมิของดีเทคเตอร์เท่ากับ 290 °C



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

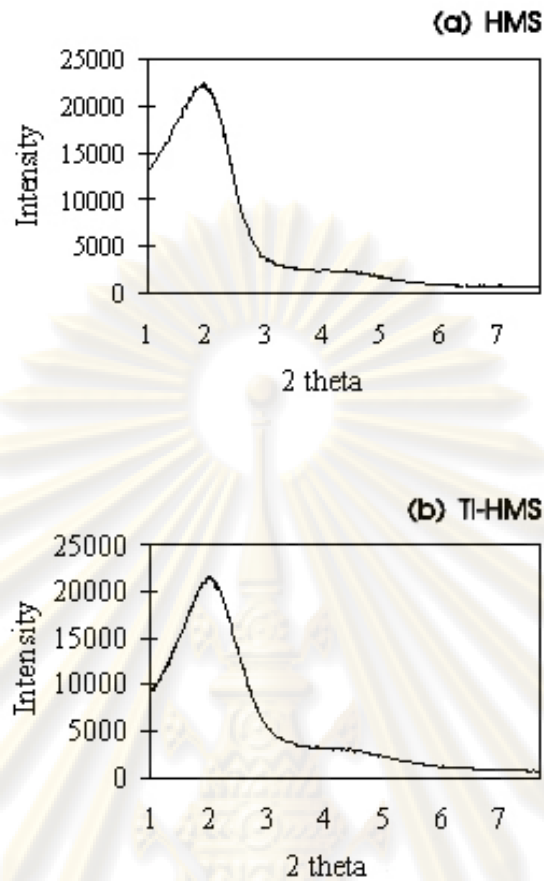
### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ

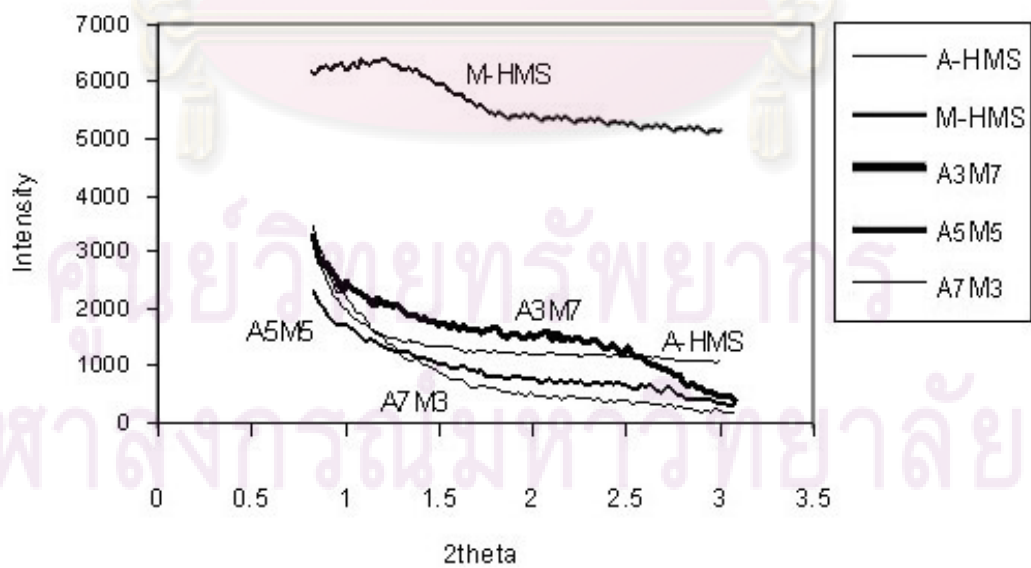
ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกต และปรับปรุงพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกต โดยการแทนที่ด้วยโลหะไททานเนียม และต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ได้แก่ หมู่อะมิโน และ หมู่เมอร์แคปโต ในการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตใช้โดเดซิลามีนเป็นสารแม่แบบ และใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตเป็นแหล่งของซิลิกา ส่วนการต่อติดหมู่ฟังก์ชันนั้นทำโดยวิธีการต่อติดโดยตรงขณะผลึกก่อตัว (Direct co-condensation method) หลังจากสังเคราะห์ได้มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆแล้วจะนำไปเผา หรือสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารอินทรีย์หรือสารแม่แบบที่ตกค้าง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง และนำไปอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดต่อไป

##### 4.1.1 โครงสร้างรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกต

ศึกษาโครงสร้างของมีโซพอร์สซิลิเกตโดย X-Ray Powder Diffraction ด้วยเครื่อง Diffractometer; Bruker AXS Model D8 ที่ scanning rate  $1,000 \text{ deg min}^{-1}$  ในช่วง  $0.35^\circ - 6.0^\circ$  ( $2\theta$ ) จากรูปที่ 4.1 แสดง XRD ของ HMS และ Ti-HMS พบว่ามีโซพอร์สที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 ชนิด มีสเปกตรัมที่เด่นชัดในช่วง  $2\theta = 2.2^\circ$  และหลังในช่วง  $4.3^\circ$  สเปกตรัมจะเริ่มไม่ชัดเจน จากสเปกตรัมในช่วงดังกล่าวอาจแสดงได้ถึงโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมของมีโซพอร์สซิลิเกต แม้ HMS จะมีโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมที่ไม่สมบูรณ์นัก เมื่อเปรียบเทียบกับมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดอื่นที่มีโครงสร้างหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน (Suwat, 2006) ส่วน XRD ของ HMS ที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ A-HMS และ M-HMS พบว่าสเปกตรัมของ XRD นั้นหายไปและเคลื่อนตำแหน่งไปตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมไป อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ HMS สามารถบ่งชี้ได้ว่า โครงสร้างผลึกของมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์นั้นจะเกิดการสูญหายไป เนื่องมาจากกระบวนการต่อติดโดยตรงขณะผลึกก่อตัว (Direct co-condensation method) นอกจากนี้จากงานวิจัยที่เคยมีการศึกษามาก่อนหน้านี้ยังให้ข้อมูลว่า สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ และปริมาณสารเคมีที่ใช้ยังมีผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น โครงสร้างของรูพรุนของมีโซพอร์สที่จะสังเคราะห์ได้อีกด้วย (Tanev *et al.*, 1996)



รูปที่ 4.1 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ (a) HMS และ (b) Ti-HMS



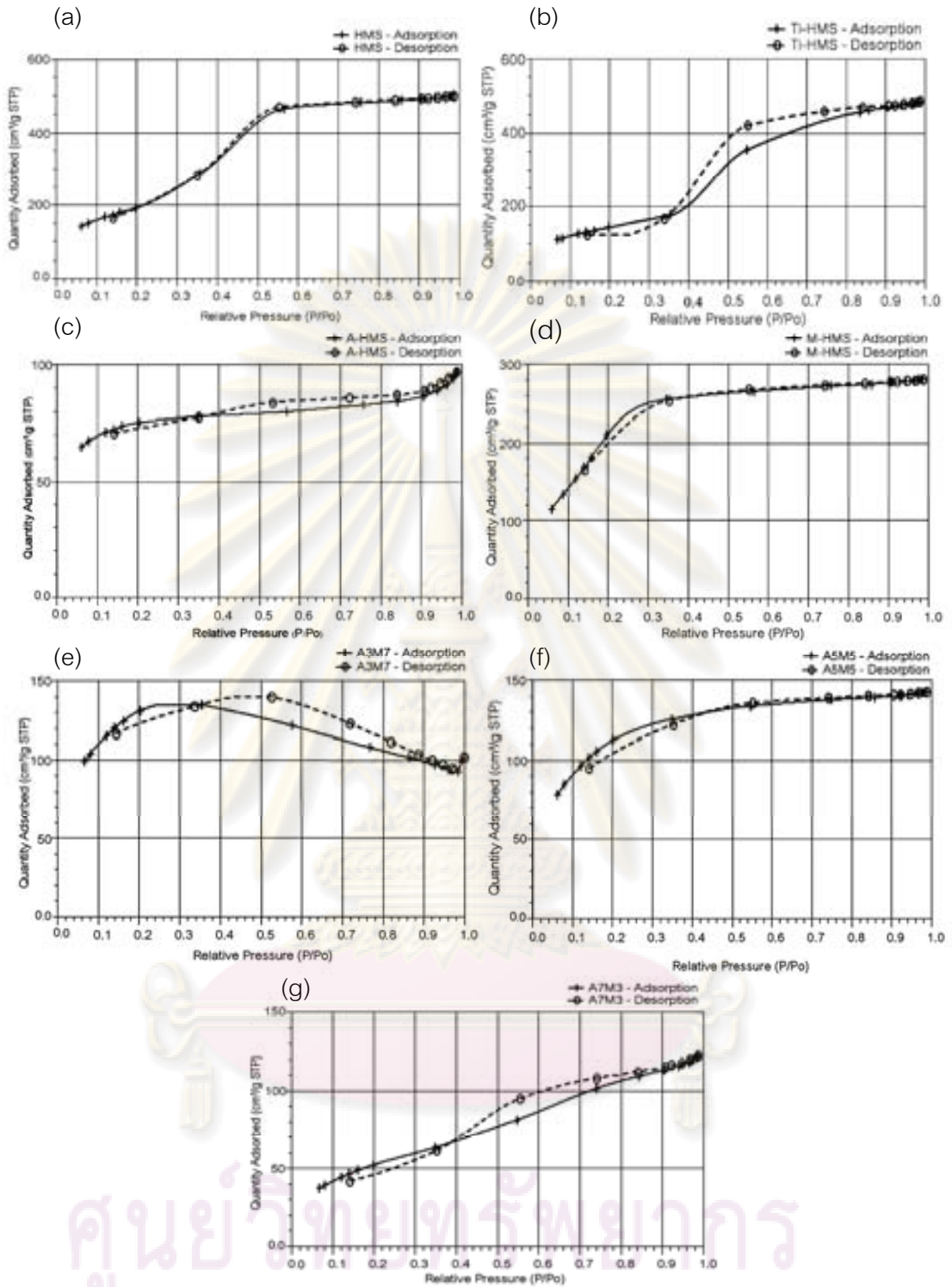
ภาพที่ 4.2 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3

#### 4.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุน

วิธีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) เป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของวัสดุที่มีรูพรุนชนิดต่างๆ โดยใช้หลักการการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งวัดที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน ด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04H ไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4.3 ในส่วนของพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC แสดงดังตารางที่ 4.1

พื้นที่ผิวจำเพาะของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC พบว่าเท่ากับ 712, 767, 262, 912, 482, 426, 200 และ 980  $\text{m}^2/\text{g}$  ตามลำดับ พื้นที่ผิวจำเพาะของ M-HMS สูงที่สุด ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากของ M-HMS นี้ อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ M-HMS มีความสามารถในการดูดซับสูง นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่า การต่อติดหมู่อะมิโนจะทำให้มีไซพอร์สที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ยิ่งมีสัดส่วนหมู่อะมิโนมากยิ่งทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดน้อยลงไปตามลำดับ ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากเกิดการเชื่อมโยงข้าม (Cross-Linked) ระหว่างหมู่อะมิโนกับหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของมีไซพอร์สซิลิเกต ทำให้โครงสร้างรูพรุนของมีไซพอร์สซิลิเกตถูกทำลาย ซึ่งจะเห็นได้จากขนาดของรูพรุนของ A-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่า HMS จึงอาจเป็นสาเหตุมาจากการพังทลายของโครงสร้างแบบหกเหลี่ยมของผลึก

ในส่วนของกระจายขนาดของรูพรุนของมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ พบว่าขนาดของรูพรุนของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 เท่ากับ 2.60, 3.18, 3.95, 2.48, 2.50, 2.60 และ 3.58 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า PAC มีขนาดของรูพรุนเล็กที่สุดซึ่งสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีมากที่สุดเช่นกัน จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า HMS และ มีไซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวนั้น มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร บ่งชี้ได้ว่า มีไซพอร์สซิลิเกตที่สังเคราะห์ขึ้นได้นั้นมีโครงสร้างเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง



รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ (a) HMS (b) Ti-HMS (c) A-HMS (d) M-HMS (e) A3M7 (f) A5M5 (g) A7M3

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ

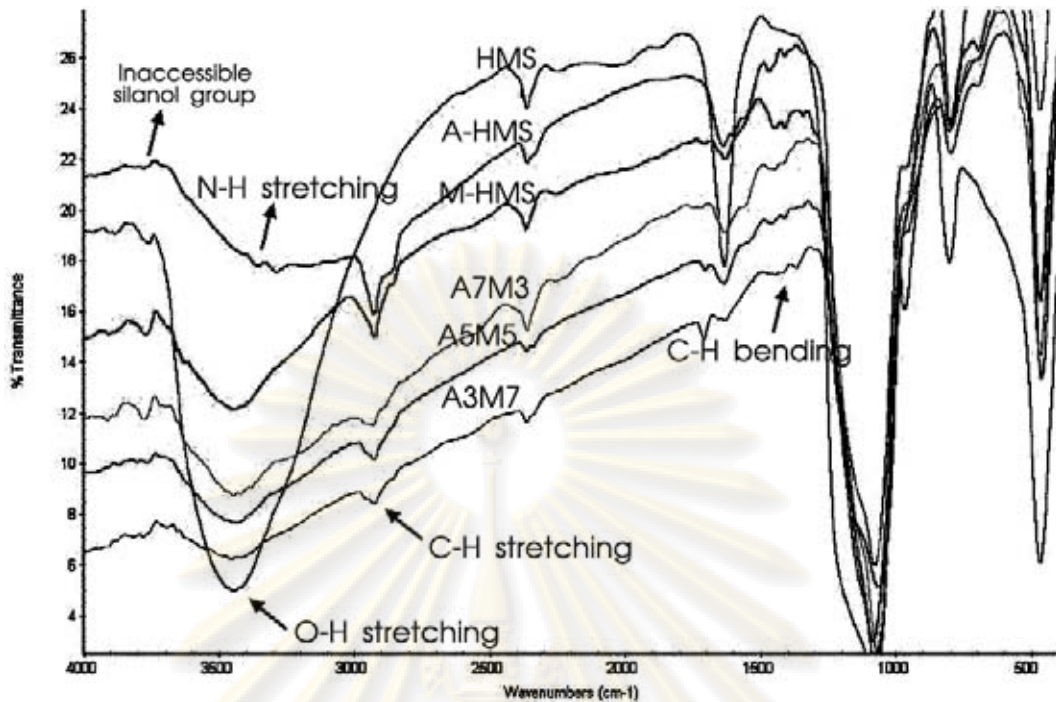
ตัวกลางดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	ขนาดของรูพรุน (nm)	ปริมาตรของรูพรุน (mm <sup>3</sup> /g)	หมู่ฟังก์ชัน
HMS	712	2.60	773.42	ซิลานอล
Ti-HMS	767	3.18	1276.00	ซิลานอล
A-HMS	262	3.95	147.26	ซิลานอล และ อะมิโน
M-HMS	912	2.48	433.47	ซิลานอล และ เมอร์แคปโต
A3M7	482	2.50	151.98	ซิลานอล, อะมิโน และ เมอร์แคปโต
A5M5	426	2.60	220.46	ซิลานอล, อะมิโน และ เมอร์แคปโต
A7M3	200	3.58	186.82	ซิลานอล, อะมิโน และ เมอร์แคปโต
PAC	980	1.90	276.00	คาร์บอนิล, ฟีนิล และอื่นๆ

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ พบว่า การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบคู่่นั้นมีผลต่อขนาดของรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการต่อติดหมู่อะมิโนที่ทำให้โครงสร้างผลึกเสียความเป็นเอกรูปส่งผลให้ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น ส่วนการปรับปรุงพื้นผิวโดยการแทนที่ด้วยโลหะไททาเนียมทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น ในขณะที่การต่อติดหมู่เมอร์แคปโต ส่งผลต่อโครงสร้างรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกตอย่างเด่นชัดเช่นเดียวกัน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ HMS ชนิดต่างๆ วิเคราะห์โดยเทคนิค FT-IR ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy Nicolet Impact 410 ซึ่งสเปคตรัมที่วัดได้นั้นเกิดจากการสั่นของพันธะเคมีที่อยู่ในโมเลกุลของสารในช่วงความถี่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับธาตุและชนิดของพันธะ ในการวิจัยครั้งนี้สเปคตรัมของ FT-IR ใช้เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตที่สังเคราะห์ขึ้น และมีการปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4

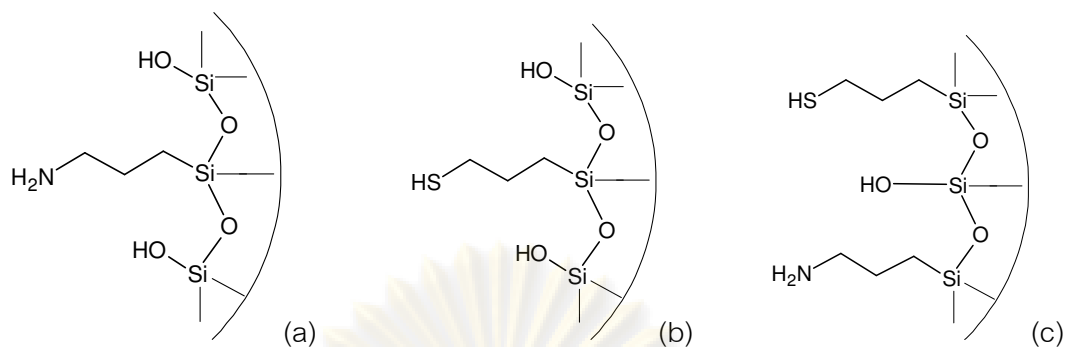




รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FT-IR ของมีโซพอร์ซิลิกาชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า HMS ทุกชนิดมีพีคที่เด่นชัดอยู่ในช่วง  $3400-3500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของ O-H stretching สามารถบอกได้ว่า HMS ทุกชนิดที่สังเคราะห์ได้นั้นมีหมู่ซิลานอลอยู่บนพื้นผิว และเห็นได้ชัดว่า HMS จะมีพีคนี้เด่นชัดมากที่สุด บ่งชี้ได้ถึงการมีหมู่ซิลานอลอยู่บนพื้นผิวมากกว่าหมู่ฟังก์ชันอื่น ในส่วนของ HMS ที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน จะมีพีคของ C-H stretching ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า  $3000\text{ cm}^{-1}$  และพีค C-H bending ของหมู่เมทิลีนในช่วง  $1450\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งพีคเหล่านี้จะไม่พบใน HMS

สำหรับ A-HMS จะพบพีคของ N-H stretching ในช่วง  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งจะบ่งชี้การมีอยู่ของหมู่อะมิโนบนพื้นผิวมีโซพอร์ซิลิกาได้ อย่างไรก็ตามในส่วนของ M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 นั้นยังไม่สามารถบ่งชี้การมีอยู่ของหมู่เมอร์แคปโตได้อย่างเด่นชัด อาจเนื่องมาจากความไวของ FT-IR ที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ยังต่ำเกินกว่าที่จะวิเคราะห์พบ S-H stretching ในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ  $2550-2600\text{ cm}^{-1}$  ที่จะพบได้จากหมู่เมอร์แคปโตได้ แต่อย่างไรก็ตาม นอกจากผลของ FT-IR จะบอกถึงหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิลิกาแล้ว ยังทำการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ เพื่อยืนยันผลการต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิลิกาอีกด้วย รูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบของ HMS ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และ หมู่เมอร์แคปโต



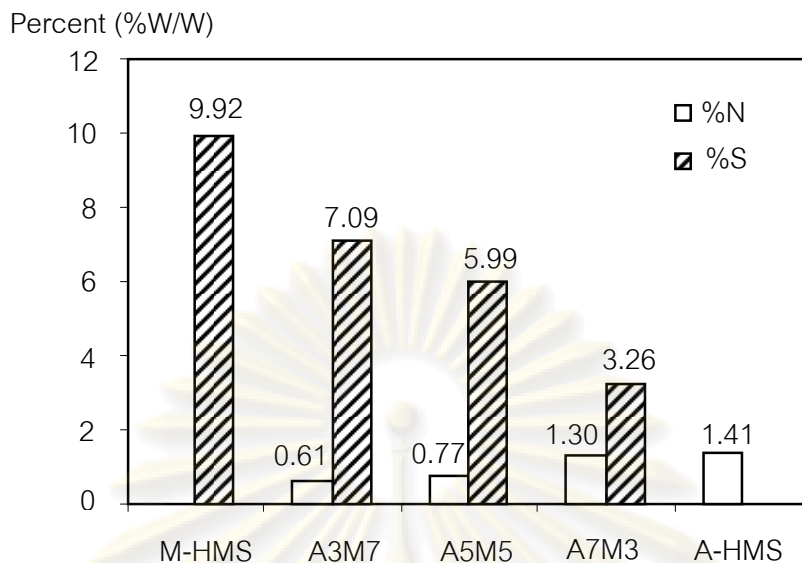
รูปที่ 4.5 มีโซพอร์สที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (a) หมู่อะมิโน (b) หมู่เมอร์แคปโต (c) หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต (Suwat, 2006)

#### 4.1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์

วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในมีโซพอร์สชนิดต่างๆที่สังเคราะห์ได้ โดยการย่อยโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ ) ในสถานะที่เป็นเบส แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrometer ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ วิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) จากรูปที่ 4.6 พบว่า ปริมาณไนโตรเจนของ A-HMS, A7M3, A5M5 และ A3M7 เท่ากับ 1.41, 1.30, 0.77 และ 0.61 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณของไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้จะลดลงตามอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิกาแต่ละชนิด

ปริมาณซัลเฟอร์ของ M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 เท่ากับ 9.92, 7.09, 5.99 และ 3.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณซัลเฟอร์ที่วิเคราะห์ได้จากมีโซพอร์สซิลิกาชนิดต่างๆนั้น มีเกือบเท่ากับปริมาณของหมู่เมอร์แคปโตที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งอาจบอกได้ว่า หมู่เมอร์แคปโตทำปฏิกิริยากับโครงสร้างซิลิกาเกิดการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอยู่บนพื้นผิวเกือบทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



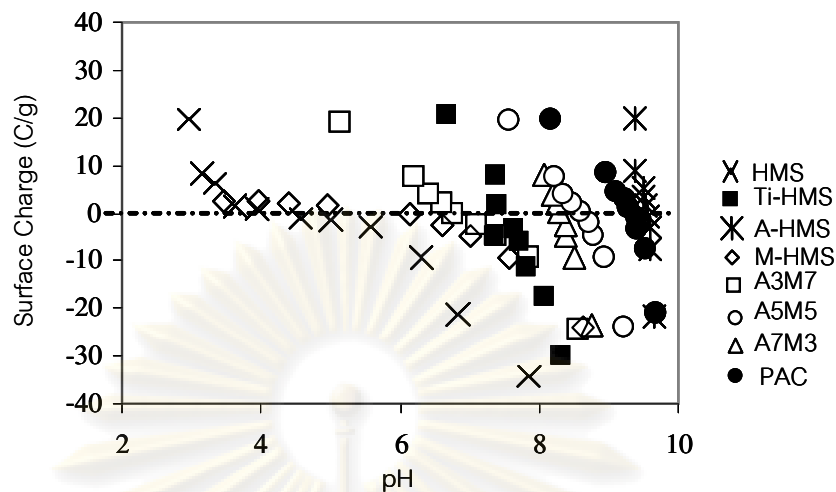
รูปที่ 4.6 ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ (%W/W) ของ A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3

#### 4.1.5 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว

ประจุบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่าง ๆ นั้น วิเคราะห์ได้จากกรไทเทรตกรด-เบส โดยในการไทเทรตจะควบคุมให้ค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุล จะทำการวัดพีเอชของสารละลายและเขียนเป็นกราฟระหว่างค่าพีเอชและประจุบนพื้นผิวซึ่งได้จากการคำนวณ

ประจุบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าพีเอชที่พื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆมีประจุเท่ากับศูนย์ เรียกว่า  $pH_{zpc}$  ค่า  $pH_{zpc}$  ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 เท่ากับ 5.5, 7.4, 9.5, 6.2, 6.7, 8.6 และ 8.3 ตามลำดับ ส่วน  $pH_{zpc}$  ของถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.5 สามารถสรุปค่า  $pH_{zpc}$  ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆได้ดังตารางที่ 4.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

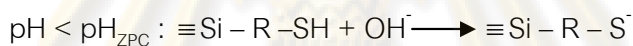
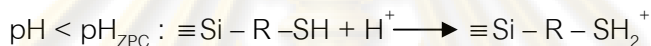
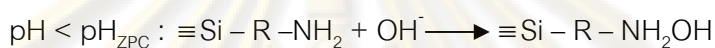
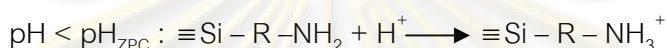
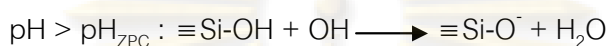
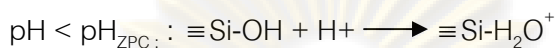


รูปที่ 4.7 ประจุบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ตารางที่ 4.2 ค่า  $pH_{zpc}$  ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

สารตัวกลางดูดซับ	ค่า $pH_{zpc}$
HMS	5.5
Ti-HMS	7.4
A-HMS	9.5
M-HMS	6.2
A3M7	6.7
A5M5	8.6
A7M3	8.3
PAC	9.5

ในช่วงที่ค่าประจุบวกและประจุบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 นั้น ความหนาแน่นของประจุจะลดลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจากช่วงกรดไปจนถึงในช่วงพีเอชที่เป็นกลาง หมู่ซิลานอลและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ จะมีการได้รับโปรตอนหรือสูญเสียโปรตอน ทำให้ประจุบนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปที่ค่าพีเอชต่างๆ สามารถแสดงได้ดังปฏิกิริยา



ที่พีเอชต่ำ บริเวณพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตจะได้รับโปรตอน ทำให้พื้นผิวนั้นมีสภาพประจุเป็นบวก ในขณะที่เมื่ออยู่ในช่วงพีเอชสูง พื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตจะสูญเสียโปรตอน ทำให้พื้นผิวมีสภาพประจุเป็นลบ สำหรับ A-HMS มีค่า  $\text{pH}_{\text{ZPC}}$  สูงกว่า HMS หมู่อะมิโนจะให้โปรตอนและทำให้พื้นผิวมีสภาพประจุเป็นบวก

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ สามารถสรุปสมบัติทางกายภาพและเคมีได้ดังตารางที่ 4.3

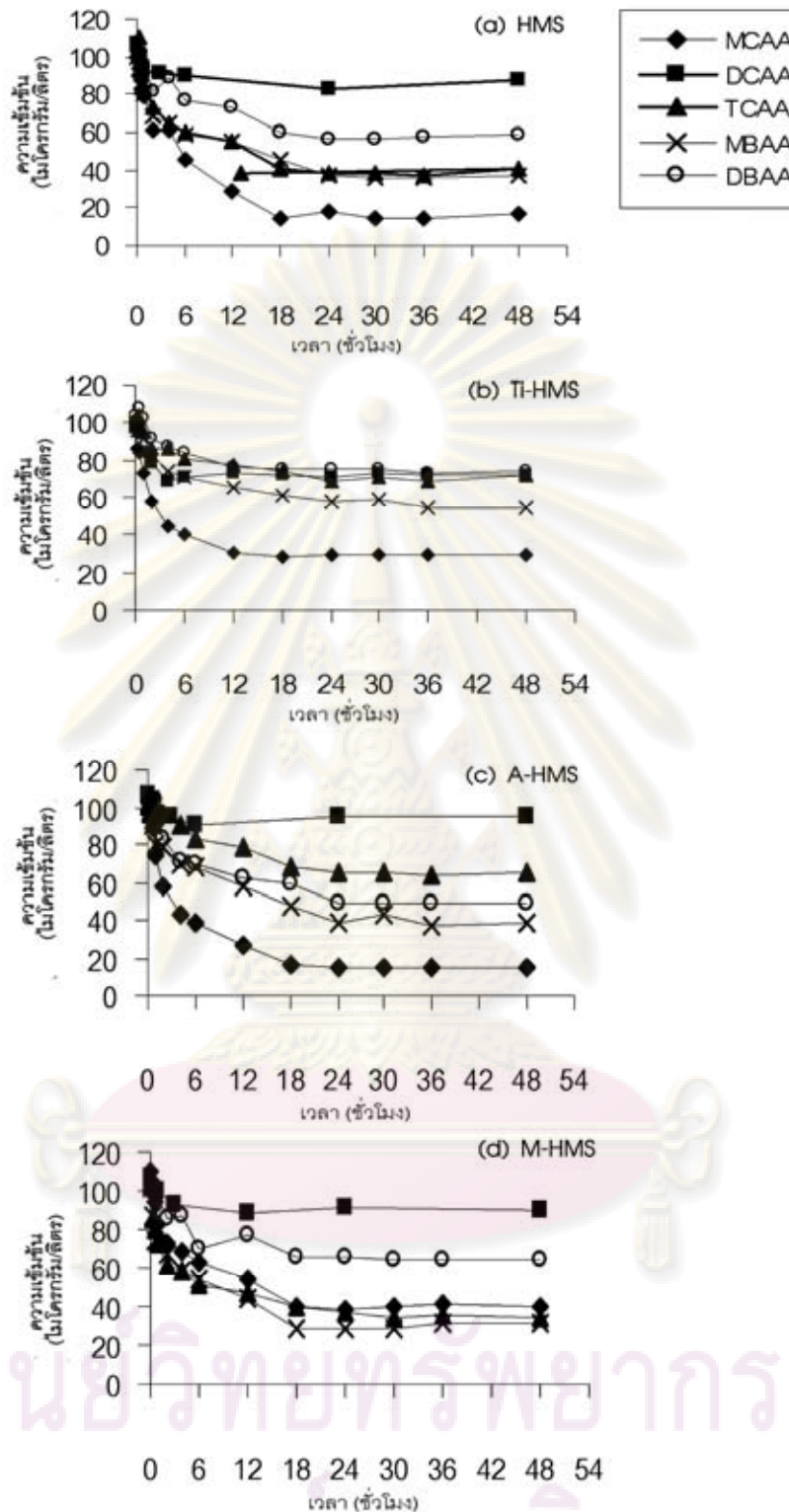
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

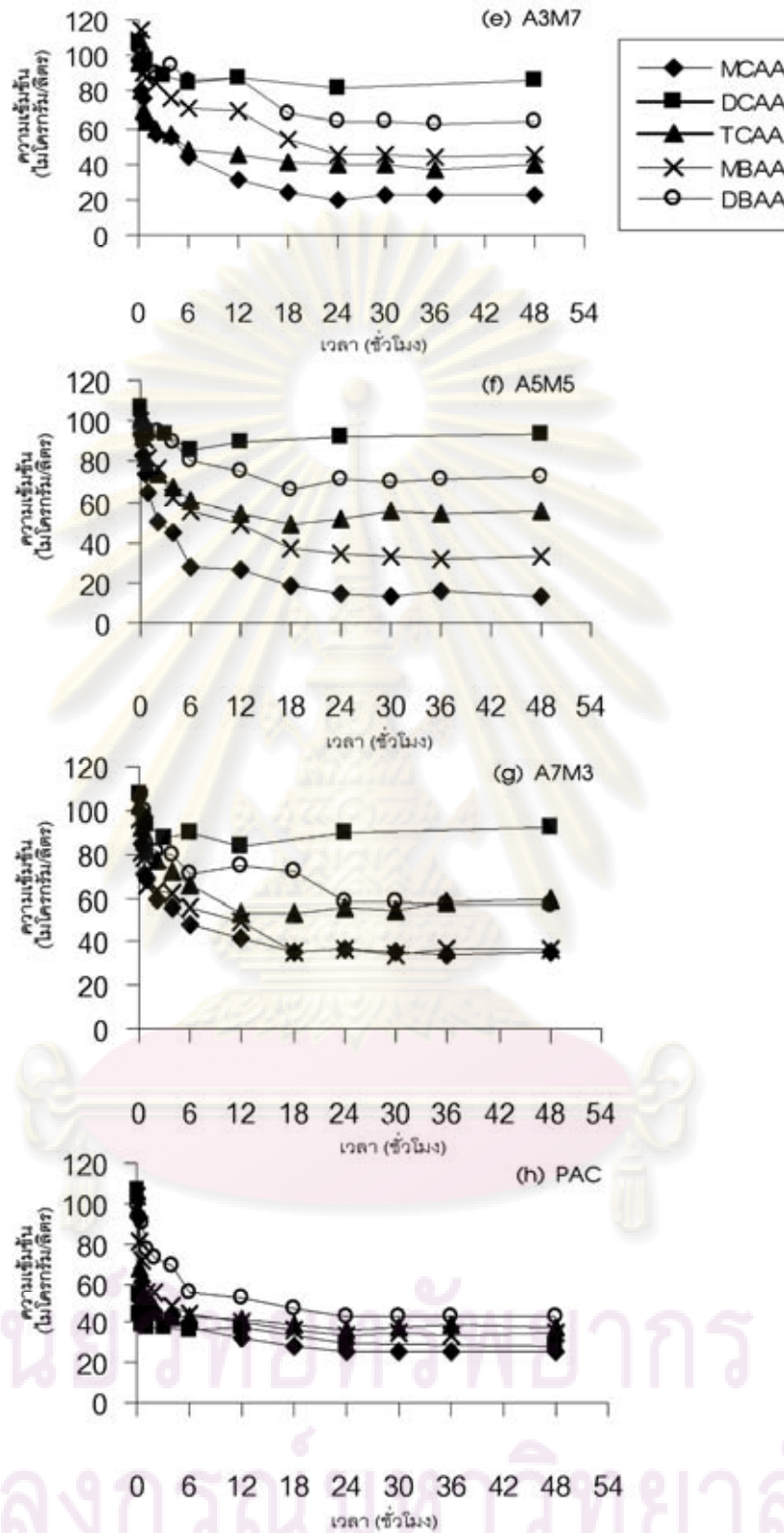
สาร ตัวกลาง ดูดซับ	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	ขนาด ของ รูพรุน (nm)	ปริมาตร ของรูพรุน (mm <sup>3</sup> /g)	pH <sub>zpc</sub>	หมู่ฟังก์ชัน	ความชอบ น้ำและไม่ ชอบน้ำ
HMS	712	2.60	773.42	5.5	ซิลานอล	ชอบน้ำ
Ti-HMS	767	3.18	1276.00	7.4	ซิลานอล	ชอบน้ำ
A-HMS	262	3.95	147.26	9.5	ซิลานอล และ อะมิโน	ชอบน้ำ
M-HMS	912	2.48	433.47	6.2	ซิลานอล และ เมอร์แคปโต	ไม่ชอบน้ำ
A3M7	482	2.50	151.98	6.7	ซิลานอล, อะมิโน และ เมอร์แคปโต	ชอบน้ำ
A5M5	426	2.60	220.46	8.6	ซิลานอล, อะมิโน และ เมอร์แคปโต	ชอบน้ำ
A7M3	200	3.58	186.82	8.3	ซิลานอล, อะมิโน และ เมอร์แคปโต	ชอบน้ำ
PAC	980	1.90	276.00	9.5	คาร์บอนิล, ฟีนิล และอื่นๆ	ไม่ชอบน้ำ

#### 4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาลออะซีติก

จลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาลออะซีติกชนิดต่างๆ ได้แก่ กรดไมโนคลอโรอะซีติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) กรดไมโนโบโรอะซีติก (MBAA) และกรดไดโบโรอะซีติก (DBAA) โดยมีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ทำการทดลองแบบที่ละเท โดยแปลงค่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 48 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของกรดฮาลออะซีติกแต่ละชนิดเท่ากับ 100 µg/l และใช้ปริมาณสารตัวกลางดูดซับเท่ากับ 0.05 กรัม ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เขย่าตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเท่ากับ 250 รอบ/นาที จนเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า อัตราการดูดซับกรดฮาลออะซีติกแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 0 ถึง 6 ชั่วโมง และเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง เมื่อดูดซับด้วย HMS ความเข้มข้นจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าตัวกลางดูดซับชนิดอื่น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ PAC พบว่า ความเข้มข้นของกรดฮาลออะซีติกแต่ละชนิดจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าการดูดซับด้วยมีไซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ซึ่งอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของ PAC นั้น มีความซับซ้อนมากกว่ามีไซพอร์สซิลิเกต



รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาลอะซีติกของ (a) HMS (b) Ti-HMS (c) A-HMS (d) M-HMS (e) A3M7 (f) A5M5 (g) A7M3 (h) PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.8 (ต่อ) จลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาลออะซิติกของ (a) HMS (b) Ti-HMS (c) A-HMS (d) M-HMS (e) A3M7 (f) A5M5 (g) A7M3 (h) PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$



การวิเคราะห์อัตราเร็วในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกชนิดต่างๆ ด้วยมีโซพอร์ส ซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม (Pseudo-First Order Equation) ของ Lagergren

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

และสมการปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (Pseudo-Second Order Equation) ของ Lagergren

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

เมื่อ  $k_1$  = Lagergren rate constant ( $h^{-1}$ )

$k_2$  = Pseudo-second-order rate constant ( $g\ mg^{-1}\ h^{-1}$ )

$q_e$  = ปริมาณของกรดฮาโลอะซีติกที่ถูกดูดซับที่สภาวะ สมดุล ( $mg/g$ )

$q_t$  = ปริมาณของกรดฮาโลอะซีติกที่ถูกดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $mg/g$ )

ค่าตัวแปรต่างๆทางจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> ด้วยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.8

จากตารางที่ 4.4 พบว่า A3M7 ดูดซับกรด MCAA ได้รวดเร็วที่สุด รองลงมาคือ A5M5, PAC, A7M3, Ti-HMS, A-HMS, HMS และ M-HMS ตามลำดับ แสดงว่า A3M7 จะดูดซับกรด MCAA ได้เร็วและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าสารตัวกลางดูดซับอื่นๆ โดย A3M7 มีอัตราเร็วในการดูดซับ เท่ากับ 56.975 ไมโครกรัม/กรัม\*ชั่วโมง สามารถคำนวณได้จาก กำลังสองของปริมาณ MCAA ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการคำนวณคูณกับค่า  $k_2$  ซึ่งค่า  $k_2$  คำนวณจากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) พบว่า HMS มีค่า  $k_2$  น้อยที่สุดสามารถบอกได้ว่า HMS สามารถดูดซับกรด MCAA ได้ดีกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นเมื่อใช้สารตัวกลางดูดซับ 1 กรัม คือ การดูดซับกรด MCAA เมื่อใช้ HMS เป็นสารตัวกลางดูดซับใช้ในปริมาณน้อย แต่สามารถดูดซับกรด MCAA ได้ในปริมาณมาก

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC

สาร ตัวกลาง ดูดซับ	Pseudo - First Order		Pseudo – Second Order		ปริมาณของ MCAAที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การคำนวณ ( $\mu\text{g/g}$ )	ปริมาณ ของMCAA ที่ถูกดูดซับ ที่สภาวะ สมดุลจาก การทดลอง ( $\mu\text{g/g}$ )	อัตราเร็ว ในการ ดูดซับ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )
	$R^2$	$k_1$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$R^2$	$k_2$ ( $\text{g}/\mu\text{g}\cdot\text{h}$ )			
HMS	0.984	0.190	0.959	0.006	48.077	40.261	13.868
Ti-HMS	0.980	0.385	0.995	0.014	39.682	35.142	22.045
A-HMS	0.945	0.168	0.989	0.007	46.296	42.059	15.003
M-HMS	0.893	0.198	0.838	0.015	30.211	30.304	13.690
A3M7	0.862	0.166	0.972	0.071	28.328	39.712	56.975
A5M5	0.931	0.153	0.952	0.033	37.453	42.916	46.290
A7M3	0.967	0.189	0.992	0.034	30.864	31.372	32.388
PAC	0.879	0.163	0.998	0.026	38.023	36.875	37.589

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC

สาร ตัวกลาง ดูดซับ	Pseudo - First Order		Pseudo – Second Order		ปริมาณของ DCAA ที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การคำนวณ ( $\mu\text{g/g}$ )	ปริมาณของ DCAA ที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การทดลอง ( $\mu\text{g/g}$ )	อัตราเร็ว ในการ ดูดซับ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )
	$R^2$	$k_1$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$R^2$	$k_2$ ( $\text{g}/\mu\text{g}\cdot\text{h}$ )			
HMS	0.723	0.159	0.986	0.073	12.438	12.141	11.293
Ti-HMS	0.986	0.756	0.989	0.069	14.492	14.284	14.492
A-HMS	0.874	1.649	1.000	0.523	5.924	5.801	18.354
M-HMS	0.982	0.596	0.996	0.210	8.418	7.692	14.881
A3M7	0.657	0.102	0.991	0.332	10.741	10.357	38.303
A5M5	0.674	0.095	0.995	0.612	6.423	7.139	25.248
A7M3	0.454	0.180	0.965	0.133	11.682	8.415	18.150
PAC	0.721	1.997	1.000	0.094	38.760	38.605	141.220

ส่วนการดูดซับกรด DCAA แสดงผลดังตารางที่ 4.5 พบว่า PAC ดูดซับกรด DCAA ได้รวดเร็วที่สุด โดยมีอัตราเร็วในการดูดซับเท่ากับ 141.220 ไมโครกรัม/กรัม\*ชั่วโมง รองลงมาคือ A3M7, A5M5, A-HMS, A7M3, M-HMS, Ti-HMS และ HMS ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า PAC สามารถดูดซับกรด DCAA ได้อย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นๆ สามารถคำนวณหาค่า  $k_2$  จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) พบว่า Ti-HMS มีค่า  $k_2$  น้อยที่สุด เท่ากับ 0.069 กรัม/ไมโครกรัม\*ชั่วโมง จะบอกได้ว่า Ti-HMS สามารถดูดซับกรด DCAA ได้มากกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่น เมื่อใช้สารตัวกลางดูดซับ 1 กรัม แต่อัตราการดูดซับจะเกิดช้ากว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่น

ตารางที่ 4.6 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC

สาร ตัวกลาง ดูดซับ	Pseudo - First Order		Pseudo – Second Order		ปริมาณของ TCAAที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การคำนวณ ( $\mu\text{g/g}$ )	ปริมาณของ TCAA ที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การทดลอง ( $\mu\text{g/g}$ )	อัตราเร็ว ในการ ดูดซับ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )
	$R^2$	$k_1$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$R^2$	$k_2$ ( $\text{g}/\mu\text{g}\cdot\text{h}$ )			
HMS	0.856	0.213	0.969	0.051	24.630	30.682	30.938
Ti-HMS	0.924	0.097	0.905	0.030	14.045	15.502	5.917
A-HMS	0.942	0.120	0.443	0.002	26.041	17.346	1.356
M-HMS	0.961	0.138	0.994	0.024	30.769	31.283	22.721
A3M7	0.886	0.261	0.987	0.109	25.906	29.882	73.152
A5M5	0.819	0.196	0.989	0.022	27.472	23.543	16.603
A7M3	0.933	0.176	0.983	0.017	26.315	22.137	11.803
PAC	0.676	0.137	0.998	0.103	31.250	31.274	100.586

จากข้อมูลในตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด TCAA พบว่า PAC ดูดซับกรด TCAA ได้เร็วที่สุด โดยมีอัตราเร็วในการดูดซับเท่ากับ 100.586 ไมโครกรัม/กรัม\*ชั่วโมง รองลงมาคือ A3M7, HMS, M-HMS, A5M5, A7M3, Ti-HMS และ A-HMS ตามลำดับ สามารถบอกได้ว่า PAC จะดูดซับกรด TCAA และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็วกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาค่า  $k_2$  จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) พบว่า A-HMS มีค่า  $k_2$  น้อยที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับกรด TCAA โดยใช้ A-HMS เป็นสารตัวกลางดูดซับนั้น การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นเมื่อใช้สารตัวกลางดูดซับ 1 กรัม คือ A-HMS จะดูดซับกรด TCAA ได้ดีที่สุดเนื่องจากใช้สารตัวกลางดูดซับในปริมาณน้อย แต่สามารถดูดซับกรด TCAA ได้ในปริมาณมาก

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC

สาร ตัวกลาง ดูดซับ	Pseudo - First Order		Pseudo – Second Order		ปริมาณของ MBAAที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การคำนวณ ( $\mu\text{g/g}$ )	ปริมาณของ MBAA ที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การทดลอง ( $\mu\text{g/g}$ )	อัตราเร็ว ในการ ดูดซับ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )
	$R^2$	$k_1$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$R^2$	$k_2$ ( $\text{g}/\mu\text{g}\cdot\text{h}$ )			
HMS	0.921	0.095	0.973	0.013	29.762	31.353	11.515
Ti-HMS	0.973	0.136	0.976	0.010	23.866	20.984	5.696
A-HMS	0.965	0.098	0.964	0.009	29.850	30.621	8.019
M-HMS	0.849	0.225	0.965	0.013	36.232	35.610	17.066
A3M7	0.886	0.087	0.893	0.018	22.472	27.558	9.090
A5M5	0.955	0.164	0.986	0.007	36.101	32.679	9.123
A7M3	0.916	0.149	0.967	0.019	32.051	31.826	19.518
PAC	0.973	1.234	0.999	0.040	33.333	32.467	44.443

สำหรับการดูดซับกรด MBAA แสดงผลดังตารางที่ 4.7 พบว่า PAC สามารถดูดซับกรด MBAA ได้รวดเร็วที่สุด โดยมีอัตราเร็วในการดูดซับเท่ากับ 44.443 ไมโครกรัม/กรัม\*ชั่วโมง รองลงมาคือ A7M3, M-HMS, HMS, A5M5, A3M7, A-HMS และ Ti-HMS ตามลำดับ จึงบ่งชี้ได้ว่า PAC จะดูดซับกรด MBAA ได้อย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นๆ และยังสามารรถคำนวณหาค่า  $k_2$  จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) พบว่า A-HMS มีค่า  $k_2$  น้อยที่สุด เท่ากับ 0.009 กรัม/ไมโครกรัม\*ชั่วโมง บ่งชี้ได้ว่า A-HMS จะดูดซับกรด MBAA ได้ดีกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นเมื่อใช้สารตัวกลางดูดซับ 1 กรัม เพราะใช้ปริมาณสารตัวกลางดูดซับน้อย แต่สามารถดูดซับกรด MBAA ได้มาก

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA) โดย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC

สาร ตัวกลาง ดูดซับ	Pseudo - First Order		Pseudo – Second Order		ปริมาณของ DBAAที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การคำนวณ ( $\mu\text{g/g}$ )	ปริมาณของ DBAA ที่ถูก ดูดซับที่ สภาวะ สมดุลจาก การทดลอง ( $\mu\text{g/g}$ )	อัตราเร็ว ในการ ดูดซับ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )
	$R^2$	$k_1$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$R^2$	$k_2$ ( $\text{g}/\mu\text{g}\cdot\text{h}$ )			
HMS	0.895	0.133	0.876	0.024	21.598	21.477	11.195
Ti-HMS	0.975	0.227	0.994	0.017	14.306	12.438	3.479
A-HMS	0.889	0.099	0.993	0.007	28.818	25.075	5.813
M-HMS	0.772	0.179	0.908	0.004	22.780	17.278	2.075
A3M7	0.787	0.100	0.622	0.001	29.070	18.406	0.845
A5M5	0.981	0.152	0.709	0.003	26.041	14.521	2.034
A7M3	0.545	0.052	0.955	0.007	23.923	21.049	4.006
PAC	0.849	0.202	0.997	0.016	29.850	27.930	14.256

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด DBAA พบว่า PAC ดูดซับกรด DBAA ได้เร็วที่สุด โดยมีอัตราเร็วในการดูดซับเท่ากับ 14.256 ไมโครกรัม/กรัม\* ชั่วโมง รองลงมาคือ HMS, A-HMS, A7M3, Ti-HMS, M-HMS, A5M5, และ A3M7 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า PAC สามารถดูดซับกรด DBAA ได้อย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นๆ และในการคำนวณหาค่า  $k_2$  จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) พบว่า A3M7 มีค่า  $k_2$  น้อยที่สุด อาจบอกได้ว่า A3M7 จะดูดซับกรด DBAA ได้ดีกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นเมื่อใช้สารตัวกลางดูดซับ 1 กรัม เพราะปริมาณใช้สารตัวกลางดูดซับน้อยแต่สามารถดูดซับกรด DBAA ได้มาก แม้จะมีอัตราเร็วในการดูดซับต่ำก็ตาม

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.8 สามารถอธิบายอัตราเร็วในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ของมีโซพอร์สซิลิเกตแต่ละชนิดได้ ดังนี้ PAC สามารถดูดซับกรด DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA ได้รวดเร็วและสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าสารตัวกลางดูดซับชนิดอื่น ส่วนกรด MCAA นั้น พบว่า A3M7 มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงสุด A3M7 และ PAC สามารถดูดซับกรด DCAA ได้เร็วที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $k_2$  จะพบว่าแม้สารตัวกลางดูดซับบางชนิด เช่น A-HMS จะมีอัตราเร็วในการดูดซับกรด TCAA และ MBAA ต่ำ แต่ก็มีค่า  $k_2$  น้อย ซึ่งหมายถึงในการดูดซับกรด TCAA และ MBAA จะใช้ปริมาณของ A-HMS น้อยแต่สามารถดูดซับกรด TCAA และ MBAA ได้มาก เช่นเดียวกับการดูดซับกรด DCAA ด้วย Ti-HMS ซึ่ง Ti-HMS มีค่า  $k_2$  น้อย แต่อัตราในการดูดซับต่ำเช่นกัน ดังนั้นจึงบอกได้ว่า PAC สามารถดูดซับกรดฮาโลอะซีติกทุกชนิดได้รวดเร็วที่สุด ยกเว้น MCAA ที่ A3M7 สามารถดูดซับได้รวดเร็วกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารตัวกลางที่ใช้ในการดูดซับเท่ากันแล้ว เมื่อการดูดซับมีค่า  $k_2$  น้อยที่สุด จะบอกได้ว่าการดูดซับนั้นใช้สารตัวกลางดูดซับปริมาณน้อยแต่สามารถดูดซับมลสารได้มาก HMS จึงดูดซับกรด MCAA ได้ดีที่สุด ส่วน Ti-HMS ก็สามารถดูดซับกรด DCAA ได้ดีที่สุด และ A3M7 จะดูดซับกรด DBAA ได้ดีที่สุด เช่นเดียวกับที่ A-HMS สามารถดูดซับกรด TCAA และ MBAA ได้ดีที่สุด เมื่อดูจากค่า  $k_2$

จากการคำนวณหาค่าตัวแปรทางจลพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก 5 ชนิด พบว่า จลพลศาสตร์ของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกทั้ง 5 ชนิด เป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) เนื่องจากจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้สมการปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียมในการคำนวณแล้ว ค่าปริมาณของกรดฮาโลอะซีติกที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการทดลองจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณของกรดฮาโลอะซีติกที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ จึงอาจอธิบายพฤติกรรมในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกของมีโซพอร์สซิลิเกต ได้ว่า

1. การดูดซับขึ้นอยู่กับ ปริมาณของกรดฮาโลอะซีติกที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกต
2. พลังงานในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกในระบบนั้น ขึ้นอยู่กับพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกต
3. การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการดูดซับ และเมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับจะเกิดขึ้นช้าลง

### 4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ในการศึกษาไอโซเทอร์ม จะทำการศึกษาความสามารถการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกชนิดต่างๆด้วยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับ ความสามารถในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ จะนำผลที่วิเคราะห์ที่ได้มาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกด้วย

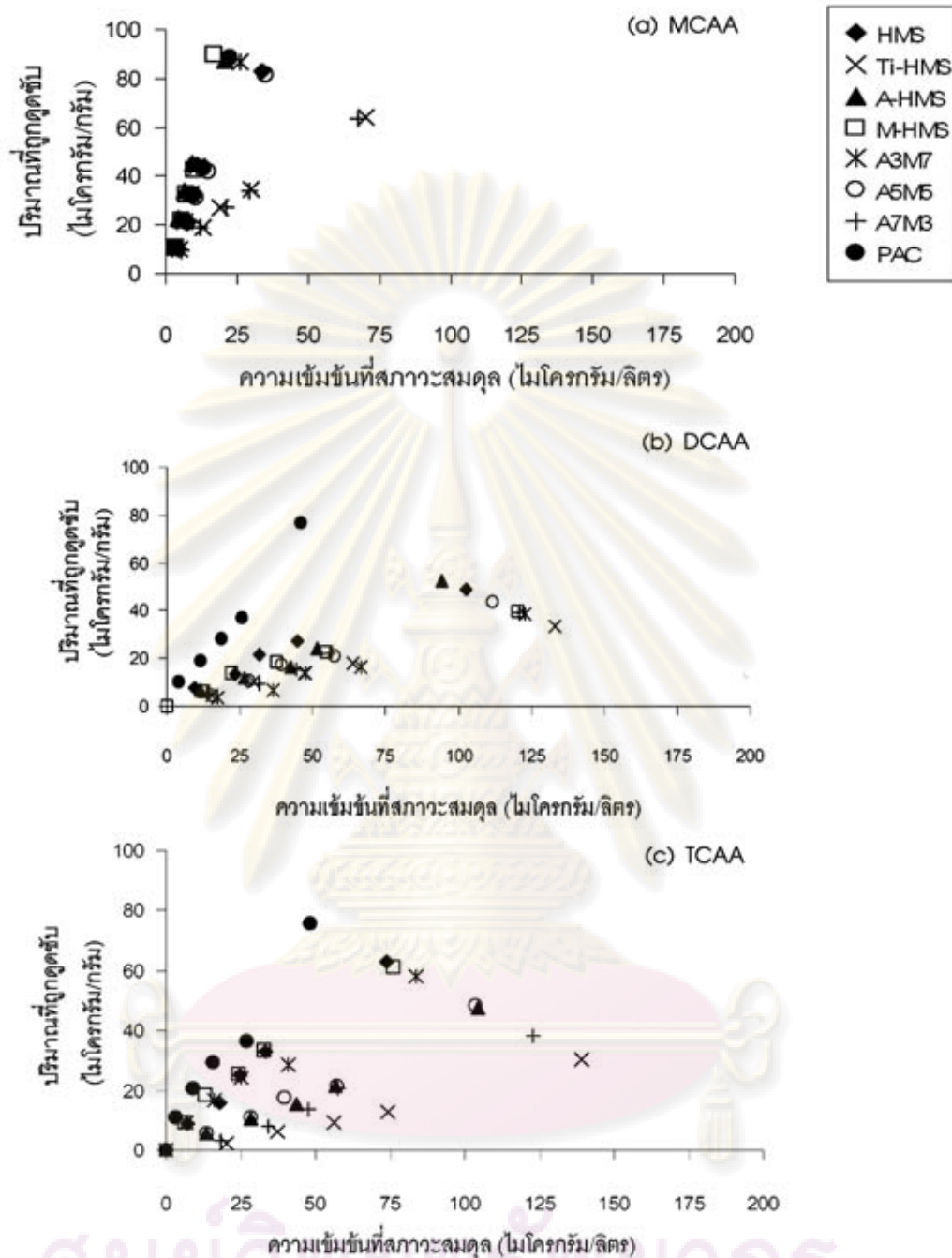
#### 4.3.1 ผลของหมู่ฟังก์ชันต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ในการทดลองเพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกชนิดต่างๆ ทำการควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.0 - 7.5 กรดฮาโลอะซีติกทั้ง 5 ชนิด ( $HAA_5$ ) ซึ่งมีค่า  $pK_a$  อยู่ในช่วง 0.66 - 2.10 จึงบอกได้ว่า  $HAA_5$  นั้นจะสามารถแตกตัวได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่า  $HAA_5$  ถูกดูดซับได้ดีด้วยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆได้ จากรูปที่ 4.9 พบว่า การดูดซับกรด MCAA นั้น M-HMS สามารถดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือ A-HMS, PAC, A3M7, HMS, A5M5, A7M3 และ Ti-HMS ส่วนการดูดซับกรด DCAA ความสามารถในการดูดซับของ PAC สูงที่สุด ตามด้วย A-HMS, HMS, A5M5, M-HMS, A7M3, A3M7 และ Ti-HMS ตามลำดับ สำหรับกรด TCAA จะถูกดูดซับด้วย PAC ได้ดีที่สุดเช่นกัน และถูกดูดซับได้ด้วย HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A-HMS, A7M3 และ Ti-HMS ตามลำดับ ในส่วนของการดูดซับกรด MBAA จะถูกดูดซับได้ด้วย PAC มากที่สุด และ A-HMS, M-HMS, HMS, A7M3, A5M5, A3M7 และ Ti-HMS ตามลำดับ สุดท้ายคือการดูดซับกรด DBAA นั้น PAC ยังคงมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด และถูกดูดซับได้ด้วย A7M3, A-HMS, M-HMS, HMS, A3M7, Ti-HMS และ A5M5 ตามลำดับ

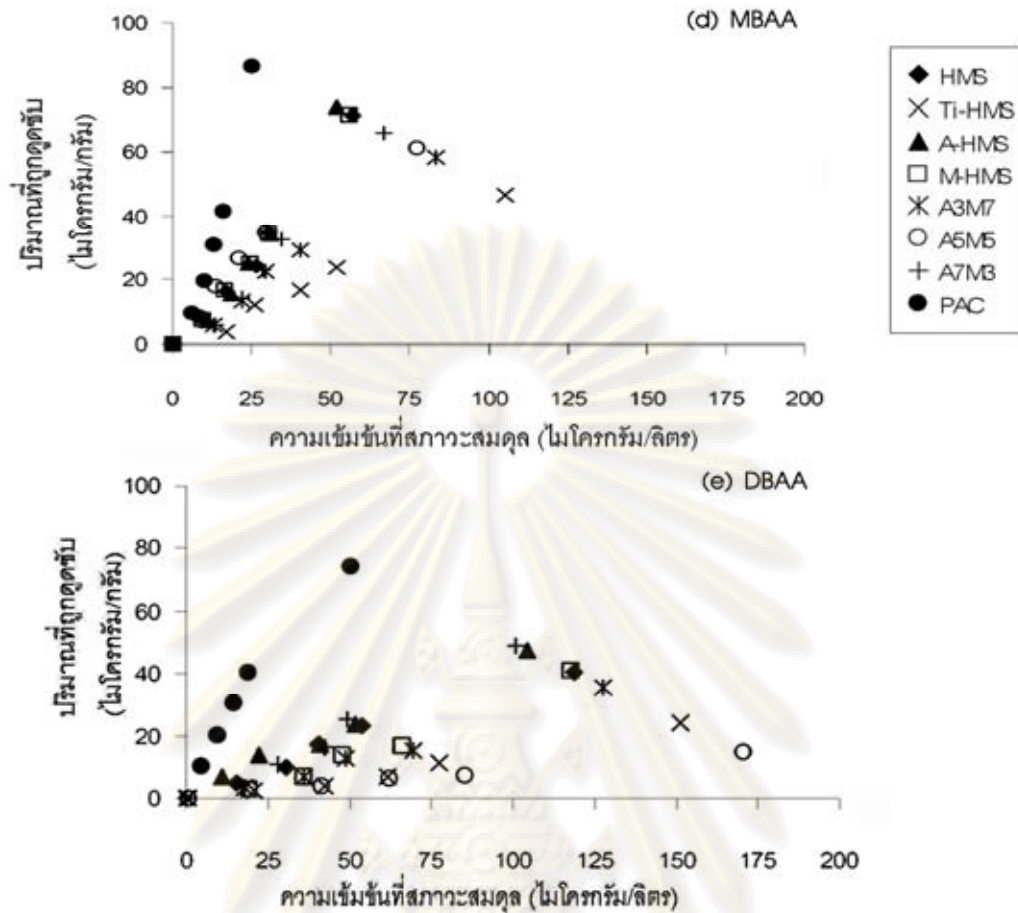
จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถบอกได้ว่า มีโซพอร์สซิลิเกตที่ทำกรต่อติดหมู่ฟังก์ชันจะมีความสามารถในการดูดซับ  $HAA_5$  ได้ดีขึ้น โดยในกลุ่มของกรดคลอโรอะซีติกซึ่งได้แก่ MCAA จะถูกดูดซับได้ดีด้วย M-HMS ส่วนการดูดซับกรด DCAA พบว่า A-HMS สามารถดูดซับกรด DCAA ได้มากกว่า ซึ่งมีโซพอร์สซิลิเกตทั้งสองชนิดเป็นมีโซพอร์สซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่เมอร์แคปโตและหมู่อะมิโน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้

โดยการต่อติดหมู่เมอร์แคปโตทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของ M-HMS มีสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับกรด MCAA มีเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ MCAA





รูปที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.9 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

ในขณะที่ HMS และ Ti-HMS ซึ่งทั้งสองชนิดต่างก็มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเช่นกัน กลับดูดซับ MCAA ได้น้อยกว่า M-HMS โดยเฉพาะ Ti-HMS ซึ่งดูดซับกรดฮาโลอะซิติกได้น้อยแทบทุกชนิด แต่อย่างไรก็ตาม HMS ยังคงดูดซับ TCAA ได้สูง แสดงให้เห็นว่าอาจมีปัจจัยอื่นร่วมด้วยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกนอกจากพื้นที่ผิวจำเพาะ

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า A-HMS สามารถดูดซับกรด DCAA ได้มาก และดูดซับ MCAA ได้ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ในกลุ่มของกรดโบรโมอะซิติก ซึ่งได้แก่ MBAA และ DBAA พบว่า A-HMS ยังดูดซับกรด MBAA ได้สูงเช่นกัน ซึ่งจากปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุบวกที่อยู่บนพื้นผิวของ A-HMS จะดึงดูดกับประจุลบของกรด DCAA ด้วยแรงทางไฟฟ้า ในกรณีนี้อาจกล่าวได้ว่า ประจุบนพื้นผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเช่นกัน

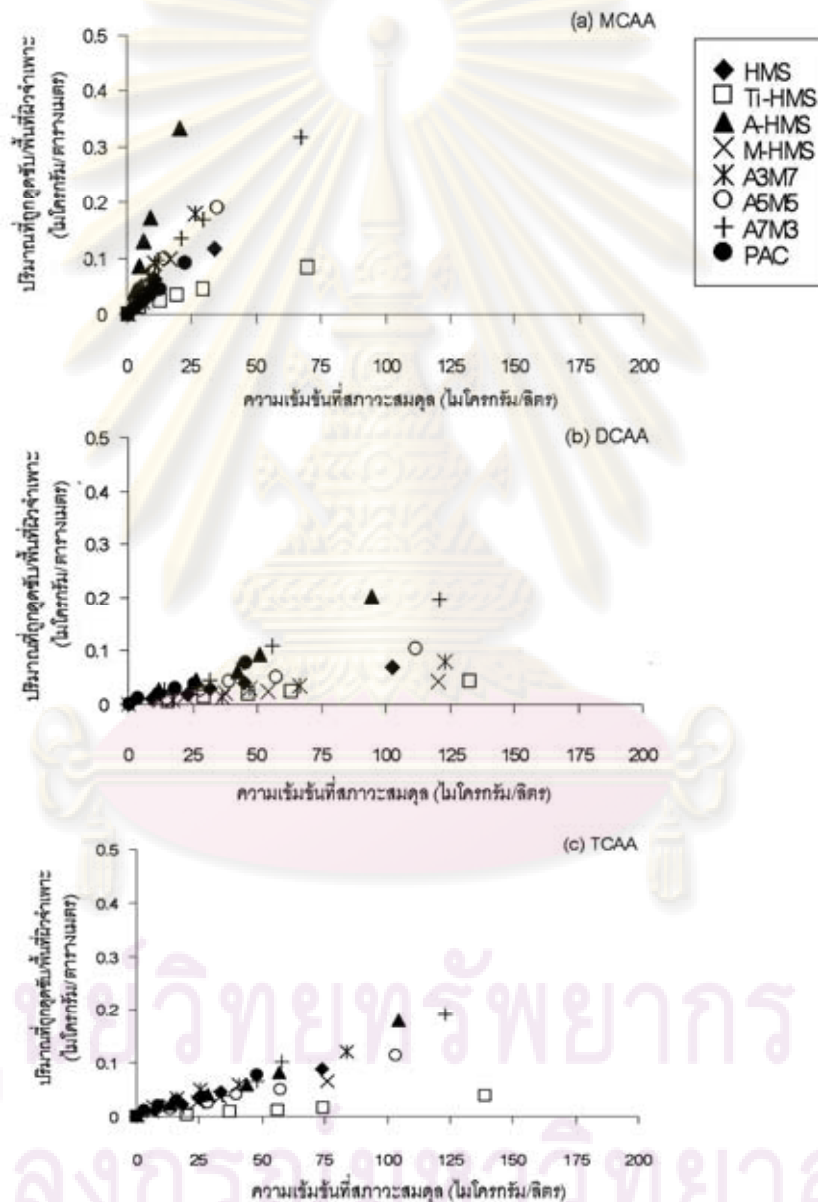
นอกจากนี้ A-HMS ยังดูดซับกรด MCAA ได้ค่อนข้างสูงอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าประจุบวกบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

ส่วนการดูดซับกรด TCAA พบว่า HMS สามารถดูดซับกรด TCAA ได้ดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับ M-HMS ที่ดูดซับกรด TCAA ได้สูงเช่นกันนั้น อาจเป็นเพราะหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของ HMS หมู่ซิลานอลทำให้ความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำที่แตกต่างกันของมีโซพอร์สซิลิเกตแต่ละชนิด ยังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับอีกด้วย โดย HMS และ A-HMS มีสมบัติความชอบน้ำจึงอาจเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้มีความสามารถในการดูดซับสูง ส่วน M-HMS ซึ่งมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ แต่กลับสามารถดูดซับ MCAA และ TCAA ได้สูง นั้นอาจเนื่องมาจากปัจจัยทางกายภาพซึ่งก็คือ พื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

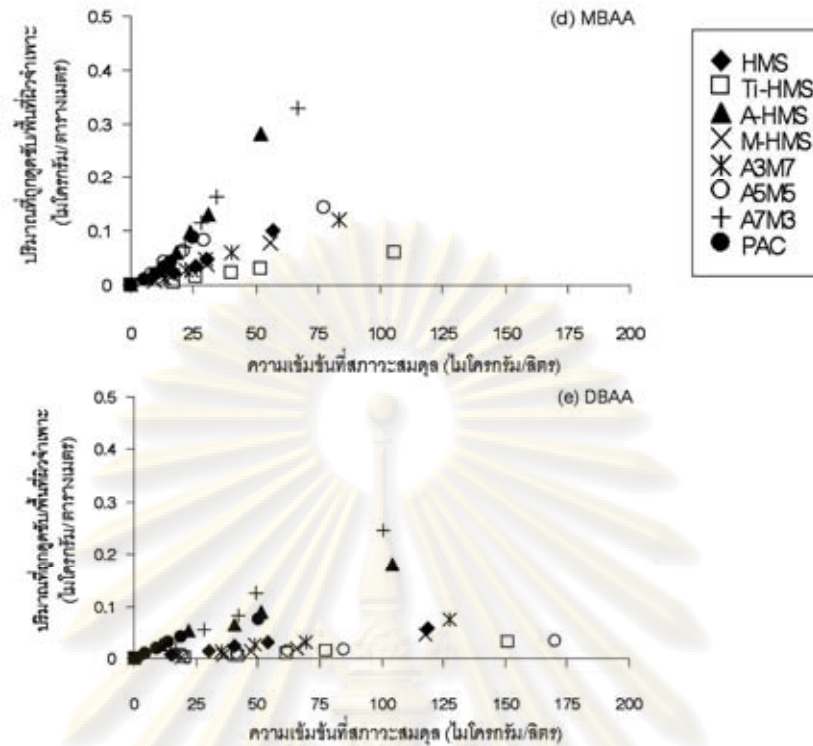
ในกรณีของการปรับปรุงพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิด พบว่า สัดส่วนที่ต่างกันของหมู่ฟังก์ชันทั้ง 2 ชนิดที่ต่อติดบนมีโซพอร์สซิลิเกตนั้น มีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  โดย A3M7 สามารถดูดซับกรด MCAA และ TCAA ได้สูง รองลงมาคือ A5M5 และ A7M3 ตามลำดับ สัมพันธ์กับ M-HMS ที่มีความสามารถในการดูดซับกรด MCAA และ TCAA ได้สูงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของเมอร์แคปโตยิ่งมาก จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับกรด MCAA และ TCAA ในขณะที่ A7M3 สามารถดูดซับกรด DCAA, MBAA และ DBAA ได้สูง แต่ไม่มีความสัมพันธ์ในเชิงสัดส่วนที่แตกต่างกัน แต่อาจบอกได้ว่า ความสามารถในการดูดซับกรด DCAA, MBAA และ DBAA ของ A7M3 นั้นมีผลมาจากประจุบนพื้นผิวและสมบัติความชอบน้ำ

อย่างไรก็ตาม หากเมื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด  $\text{HAA}_5$  ทั้งหลายที่กล่าวมาแล้วร่วมกัน จะพบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะอาจไม่ใช่ปัจจัยหลักแต่เพียงอย่างเดียว เนื่องมาจาก HMS และ Ti-HMS ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเช่นกัน กลับมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่า โดยเฉพาะ Ti-HMS จึงทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ความสามารถในการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวจำเพาะของ A-HMS มีความสามารถสูงสุด รองลงมา คือ A7M3 และจะเห็นว่าสัดส่วนที่ต่างกันของหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิดที่ต่อติดบนมีโซพอร์สซิลิเกตนั้นมีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  โดย A7M3 มีความสามารถในการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า A5M5 หรือ A3M7 ซึ่งเป็นผลมาจากการต่อติดหมู่อะมิโนบนพื้นผิวที่มากกว่า A5M5 และ A3M7 จึงอาจบ่งชี้ได้ว่าการเพิ่มหมู่อะมิโนหรือหมู่เมอร์แคปโตมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

HAA<sub>5</sub> โดยหมู่อะมิโนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> แต่การต่อติดหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ อาจทำให้โครงสร้างผลึกของมีโซพอร์สซิลิเกตถูกทำลายส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> ลดลง ส่วน Ti-HMS แม้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงหรือมีหมู่ซิลานอลอยู่บนพื้นผิว แต่ความสามารถในการดูดซับยังคงมีต่ำกว่ามีโซพอร์สซิลิเกตชนิดอื่นๆ จึงอาจบ่งชี้ได้ว่าความสามารถในการดูดซับของ HAA<sub>5</sub> เป็นผลมาจากประจุบนพื้นผิวจากการต่อติดหมู่ฟังก์ชันต่างๆ หรือสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของมีโซพอร์สซิลิเกต



รูปที่ 4.10 ความสามารถของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

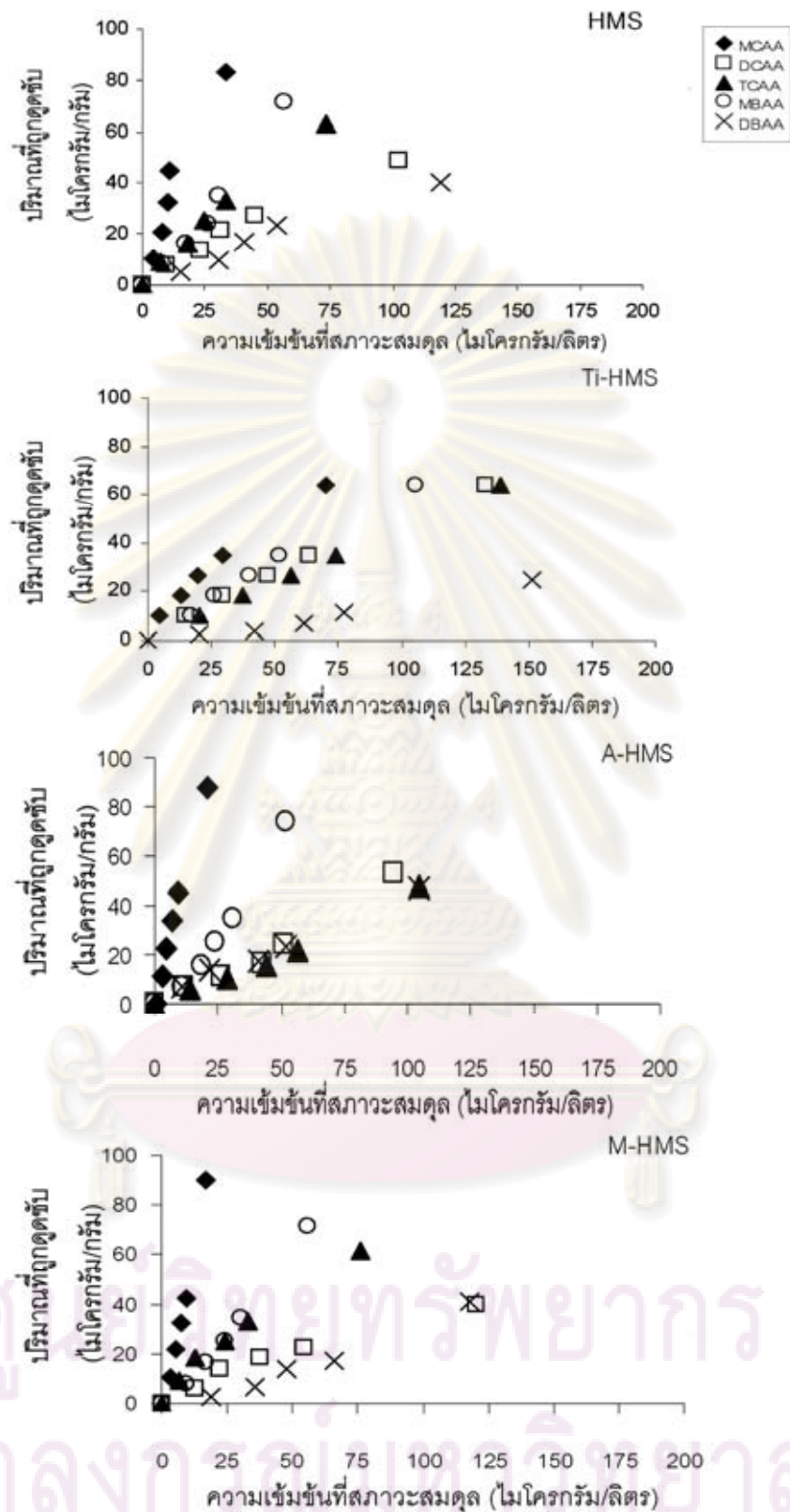


รูปที่ 4.10 (ต่อ) ความสามารถของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆในการดูดซับ (a) MCAA (b) DCAA (c) TCAA (d) MBAA (e) DBAA ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

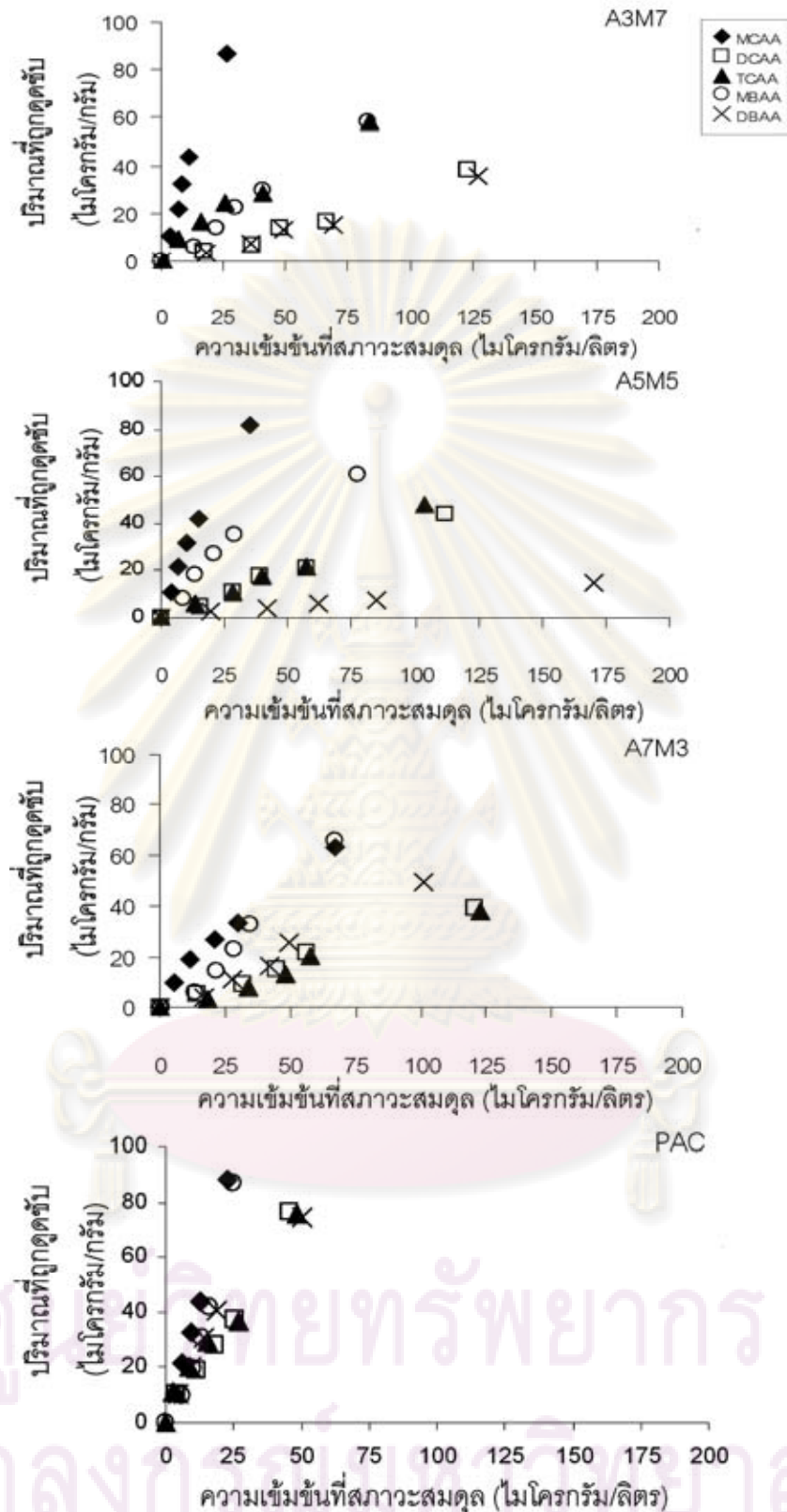
อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ PAC แล้ว ยังคงพบว่า PAC สามารถดูดซับ DCAA, TCAA, MBAA และ DBAA ได้ดีกว่า มีเพียง MCAA ที่ PAC มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่า M-HMS และ A-HMS

#### 4.3.2 ผลของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซิติกต่อความสามารถในการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง โดยพิจารณาจากความแตกต่างของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซิติกทั้ง 5 ชนิด แสดงผลดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซีติกต่อความสามารถในการดูดซับของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.11 (ต่อ) เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซิติกต่อความสามารถในการดูดซับของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^\circ\text{C}$

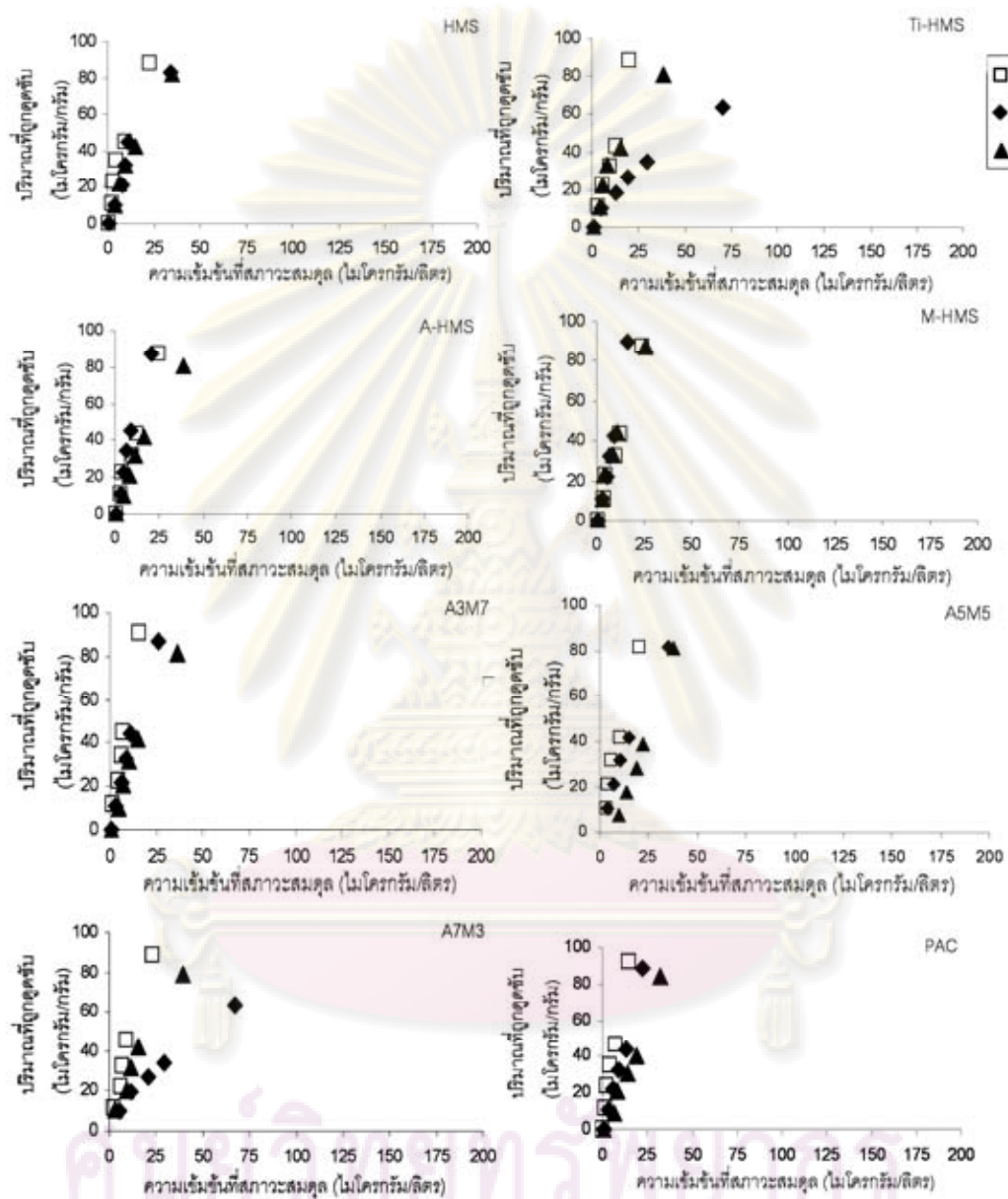
จากการศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชัน ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับกรด ฮาโลอะซีติกชนิดต่างๆ พบว่า ความสามารถในการดูดซับอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องทำให้ ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ของมีโซพอร์สซิกเกตแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ปัจจัยที่อาจ ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ คือ ความแตกต่างของโครงสร้างของ HAA<sub>5</sub> ที่แตกต่างกัน ทั้ง ชนิดของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของ HAA<sub>5</sub> และจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนที่ไม่เท่ากัน ซึ่ง จากปัจจัยดังกล่าว จึงนำไปสู่การศึกษาผลของความแตกต่างของโครงสร้างของ HAA<sub>5</sub> จากการ ทดลองพบว่า HMS มีความสามารถในการดูดซับกรด MCAA สูงสุด รองลงมาคือ MBAA, TCAA, DCAA และ DBAA ตามลำดับ ส่วน Ti-HMS จะดูดซับกรด MCAA ได้สูงสุด ตามด้วย กรด MBAA, DCAA, TCAA และ DBAA ตามลำดับ เมื่อใช้ A-HMS เป็นสารตัวกลางดูดซับ พบว่า กรด MCAA จะถูกดูดซับมากที่สุด รองลงมา คือ MBAA, DCAA, TCAA และ DBAA ตามลำดับ ส่วน M-HMS จะดูดซับกรด MCAA ได้มากที่สุด รองลงมาคือ MBAA, TCAA, DCAA และ DBAA ตามลำดับ และสำหรับ A3M7 และ A5M5 มีความสามารถในการดูดซับ MCAA สูงสุด ตามด้วย MBAA, TCAA, DCAA และ DBAA ตามลำดับ ส่วน A7M3 สามารถดูดซับ MCAA ได้มากที่สุด ตามด้วย MBAA, DBAA, DCAA และ TCAA สุดท้ายคือ PAC มีความสามารถดูดซับ MCAA ได้ สูงสุดเช่นกัน รองลงมา คือ MBAA, DCAA, TCAA และ DBAA ตามลำดับ จากผลการทดลอง ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า จำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของกรดฮาโลอะซีติก มี ผลต่อความสามารถในการดูดซับเนื่องจากจะเห็นได้ว่าทั้ง MCAA และ MBAA ที่มีอะตอมของธาตุ ฮาโลเจนเพียง 1 อะตอม สามารถถูกดูดซับได้สูงโดยตัวกลางดูดซับทุกชนิด และถูกดูดซับได้ดีกว่า กรดฮาโลอะซีติกที่มีธาตุฮาโลเจนในโมเลกุล 2 หรือ 3 อะตอม และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง ระหว่างคลอรีนและโบรมีน พบว่า กลุ่มของคลอรีนอะซีติกจะถูกดูดซับได้ดีกว่า อาจเนื่องมาจาก ขนาดของโบรมีนที่ใหญ่กว่า และมีมวลโมเลกุลสูงกว่า ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลมีความกะกะ มากกว่าจึงถูกดูดซับได้น้อยลง (Ratasuk *et al.*, 2009) โดย MCAA จะถูกดูดซับได้มากกว่า MBAA ในขณะที่กรด DCAA ก็ถูกดูดซับได้มากกว่า DBAA เช่นกัน

#### 4.3.3 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

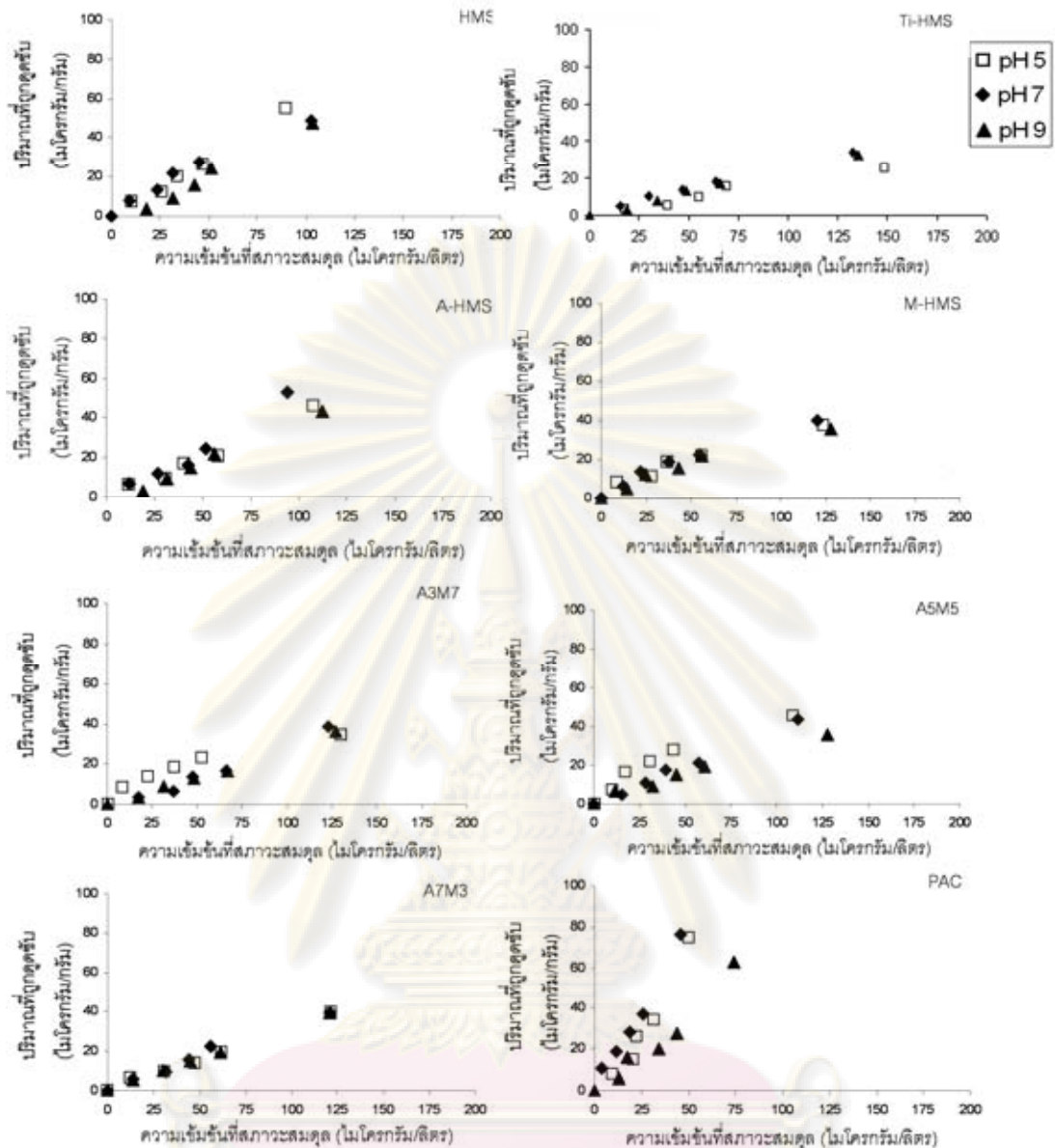
จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ ผลการ ทดลองแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า การดูดซับกรด MCAA โดยใช้ HMS, A3M7, A5M5 และ PAC ที่ พีเอช 5 มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด ส่วนที่พีเอช 7 และ 9 ความสามารถในการดูดซับ กรด MCAA นั้นไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อดูดซับด้วย Ti-HMS และ A7M3 ความสามารถในการ ดูดซับกรด MCAA จะมากที่สุดเมื่อพีเอชเท่ากับ 5 เช่นกัน แต่ที่พีเอช 9 ความสามารถในการ ดูดซับกลับสูงกว่าที่พีเอช 7 อาจเพราะผลจากแรงทางประจุน้อยกว่า ส่วนการดูดซับกรด MCAA



ด้วย A-HMS และ M-HMS ความสามารถในการดูดซับกรด MCAA เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช ไม่พบความแตกต่าง

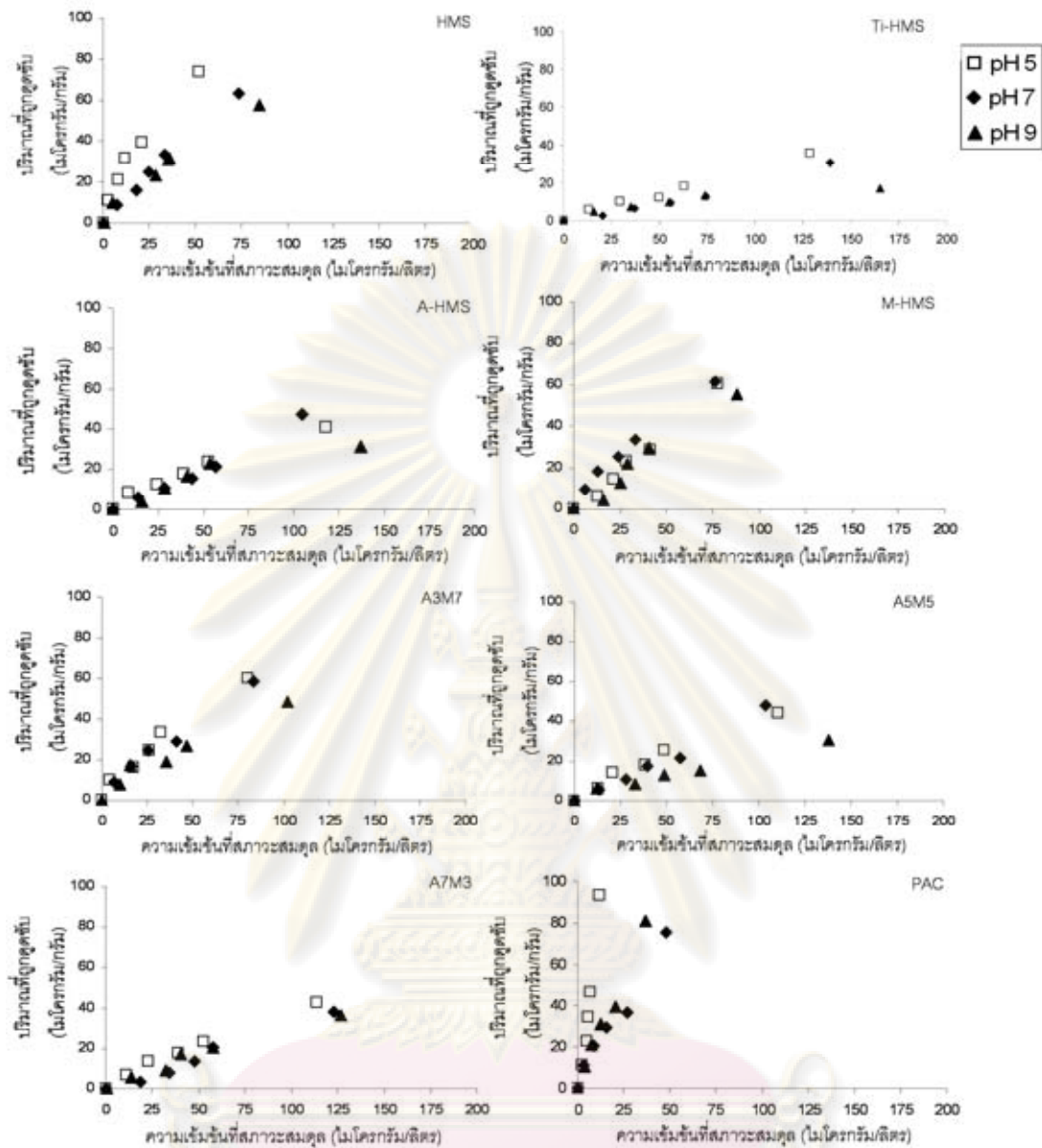


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ MCAA ของมีโซพอร์ซซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^\circ\text{C}$



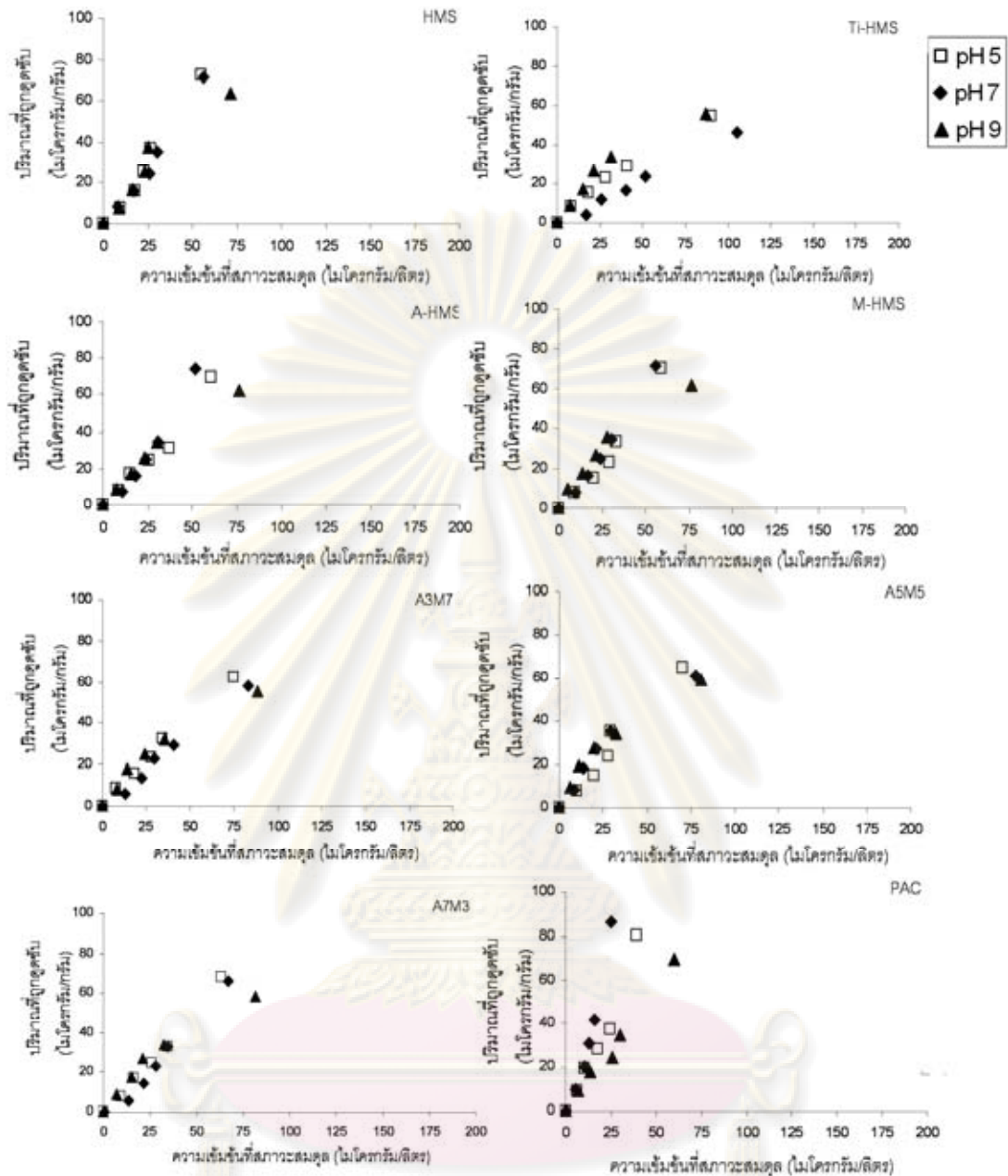
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.13 แสดงผลการดูดซับของกรด DCAA ที่พีเอช 5, 7 และ 9 พบว่า การดูดซับกรด DCAA ด้วย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 ความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพีเอชเท่ากับ 9 ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อาจบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด DCAA เพียงเล็กน้อย มีเพียงการดูดซับกรด DCAA ด้วย PAC ที่พีเอช 9 จะดูดซับได้น้อยกว่าที่พีเอช 5 และ 7 อย่างเห็นได้ชัด โดยที่พีเอช 5 และ 7 ความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน

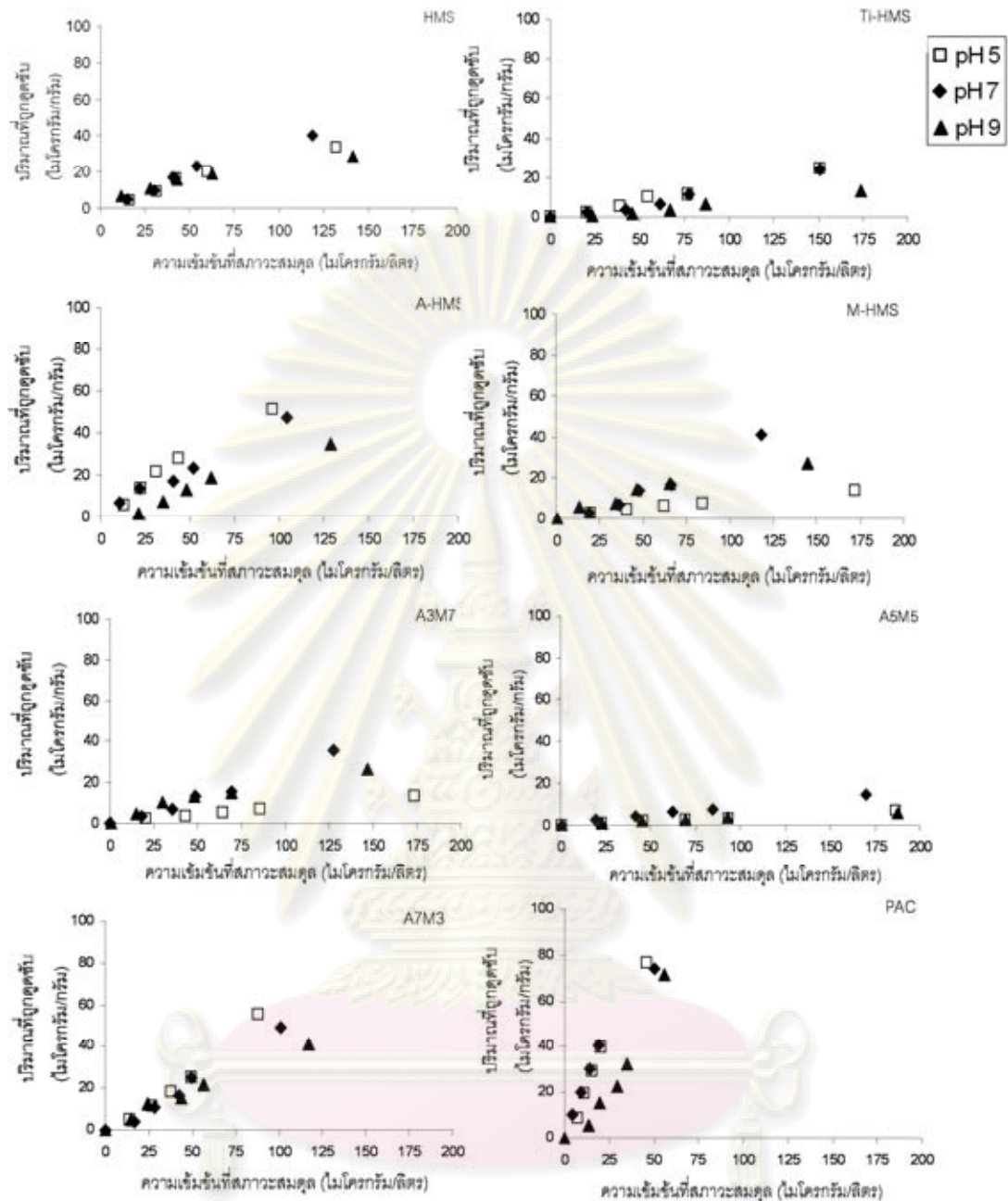


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

ส่วนการดูดซับกรด TCAA ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อดูดซับกรด TCAA ด้วย HMS, Ti-HMS และ PAC ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเท่ากับ 5 และต่ำลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 9 อาจเพราะแรงทางประจุ ส่วนเมื่อใช้สารตัวกลางดูดซับชนิดอื่นได้แก่ A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 ความสามารถในการดูดซับจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่พีเอช 9 ความสามารถในการดูดซับยังคงน้อยกว่าที่พีเอชอื่น เนื่องจากแรงทางประจุเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ MBAA ของมีโซพอร์ซซิลิเกตชนิดต่างๆที่พีเอช 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ที่พีเอช 5, 7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

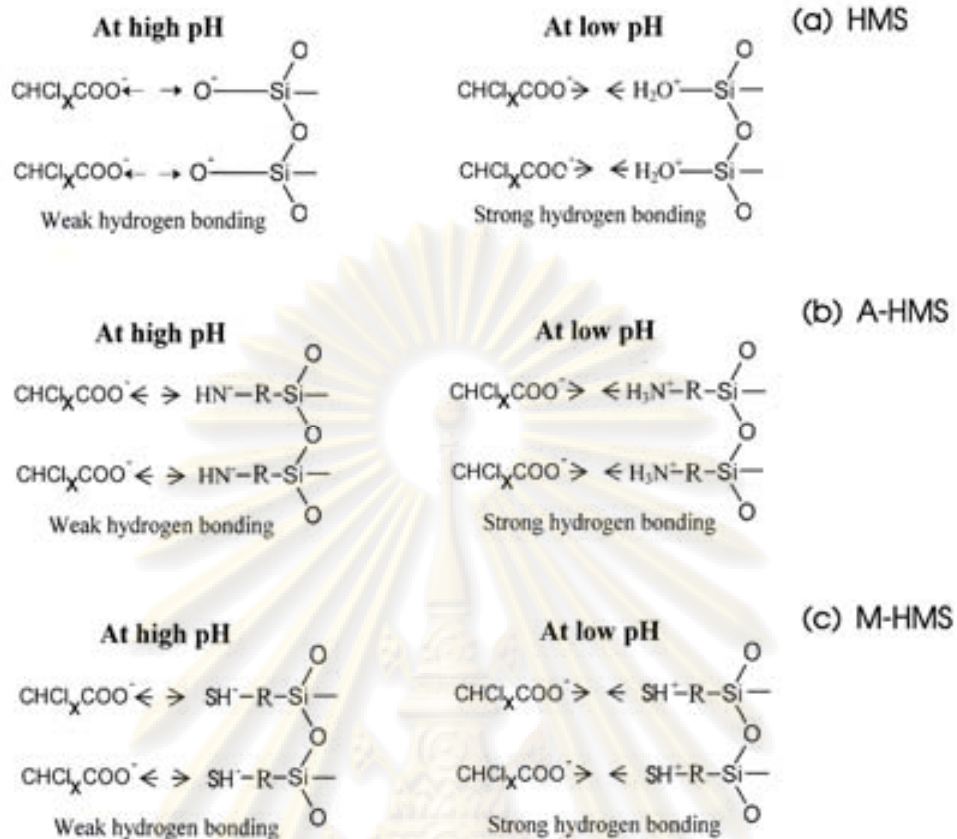
สำหรับการดูดซับกรด MBAA ด้วย HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แต่ที่พีเอช 9 ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มต่ำกว่าที่พีเอชอื่น และเมื่อดูดซับกรด DBAA พบว่า เมื่อใช้ HMS, Ti-HMS, M-HMS, A3M7 และ A5M5 เป็นสารตัวกลางดูดซับ ที่พีเอช 7 สามารถดูดซับกรด DBAA ได้ดีที่สุด

แต่เมื่อใช้ A-HMS, A7M3 และ PAC เป็นสารตัวกลางดูดซับ ที่พีเอช 5 กลับดูดซับได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับสารตัวกลางดูดซับทุกชนิด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 9

จากการทดลองโดยส่วนใหญ่แล้ว พบว่า ความสามารถในการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  ของ HMS และ Ti-HMS จะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 9 อาจเนื่องมาจากการที่หมู่ซิลานอลสูญเสียโปรตอน เมื่อความหนาแน่นของประจุบวกลดลง จึงทำให้พื้นผิวของ HMS และ Ti-HMS มีสภาพประจุเป็นลบมากกว่า ประจุลบของ  $\text{HAA}_5$  จะเกิดแรงผลักกับประจุลบของหมู่ซิลานอลที่อยู่บนพื้นผิว จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และเมื่อพีเอชลดลงเท่ากับ 5 ความสามารถในการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  ของ HMS และ Ti-HMS จะเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุลบของ  $\text{HAA}_5$  และ ประจุบวกที่เกิดขึ้นจากการที่โมเลกุลของน้ำได้รับโปรตอนกลายเป็นไฮโดรเนียมไอออน จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงอาจส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  ของ HMS และ Ti-HMS เพิ่มมากขึ้น

สำหรับมีโซพอร์ซิลิกาเกิดที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชัน การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน มีเพียงบางกรณีเท่านั้น เช่น ในการดูดซับกรด DBAA ด้วย M-HMS และ A3M7 เมื่อพีเอชลดลงจาก 7 เป็น 5 ความสามารถในการดูดซับกลับต่ำลง อาจเนื่องมาจากสมบัติความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการต่อติดหมู่เมอร์แคปโต ส่วนการดูดซับกรด TCAA ด้วย A-HMS และ A5M5 และการดูดซับกรด MCAA ด้วย A7M3 นั้น พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 9 ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น อาจเพราะความหนาแน่นของประจุมีผลน้อยกว่า

นอกจากผลของแรงทางไฟฟ้าที่สืบเนื่องมาจาก ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิลิกาเกิดที่กล่าวมาแล้วนั้นจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด  $\text{HAA}_5$  ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด  $\text{HAA}_5$  เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชอีกปัจจัยหนึ่ง คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) โดยเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  หมู่ซิลานอลจะได้รับโปรตอน มีโมเลกุลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของกรด  $\text{HAA}_5$  จึงมากขึ้น ในขณะที่เมื่อพีเอชมากกว่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  หมู่ซิลานอลจะสูญเสียโปรตอนเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนพื้นผิว ซึ่งการสูญเสียไฮโดรเจนไปนั้นจะทำให้โอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ดังนั้น จากการที่มีโซพอร์ซิลิกาเกิดชนิดต่างๆมี ความสามารถในการดูดซับกรด  $\text{HAA}_5$  สูง ที่พีเอช 5 และ 7 อาจเป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจนด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.17 แสดงความแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เปลี่ยนไปของ (a) HMS, (b) A-HMS และ (c) M-HMS เมื่อพีเอชเปลี่ยนไป

#### 4.4 การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ในการศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ โดยใช้สารละลายผสมของ  $\text{HAA}_5$  ทำการดูดซับ  $\text{HAA}_5$  ด้วยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ แบ่งการศึกษาเป็น 2 กรณี ได้แก่ ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น และ ในน้ำประปาจริง

##### 4.4.1 กรณีใช้น้ำกลั่นโดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

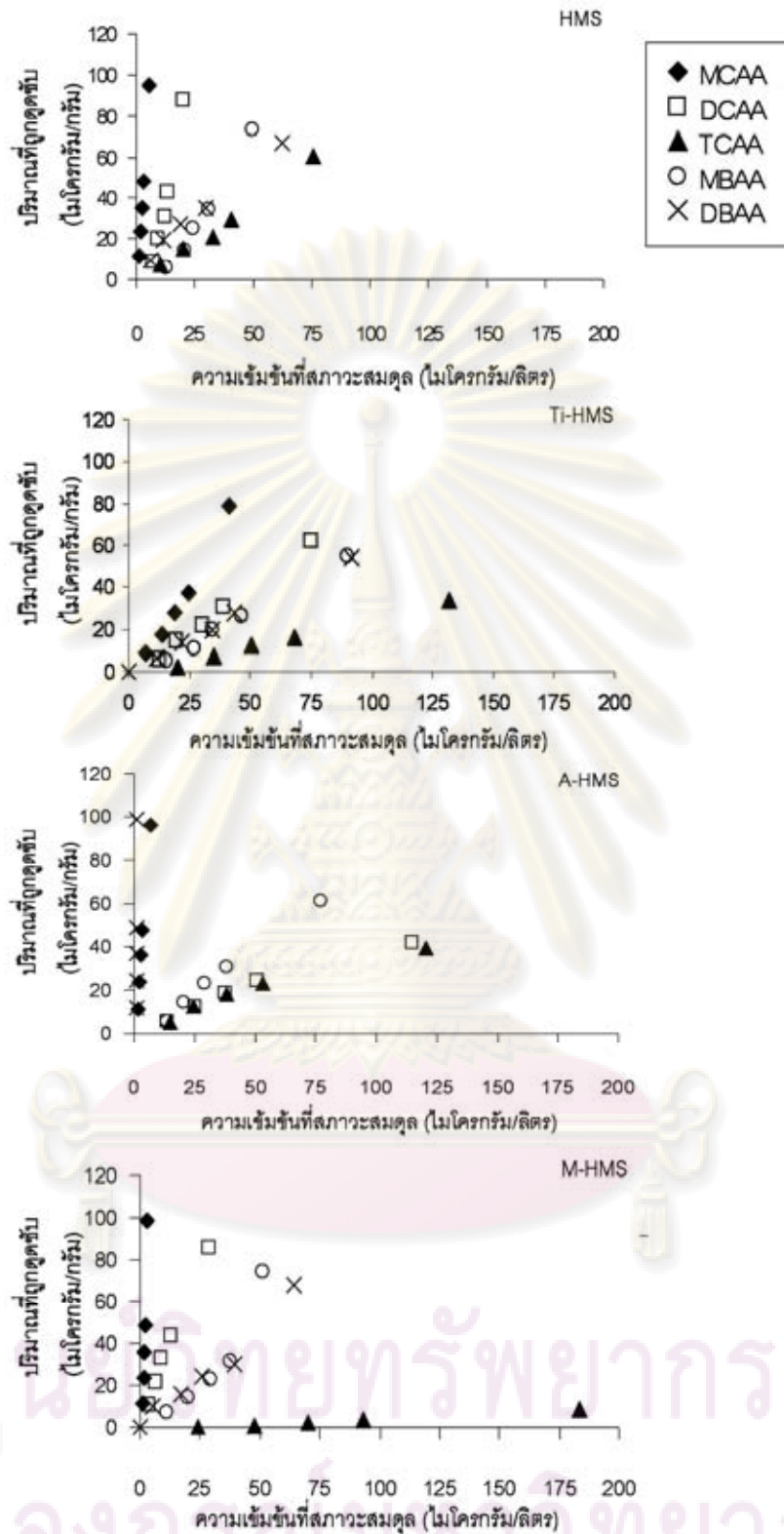
จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่า HMS, Ti-HMS และ M-HMS สามารถดูดซับกรด MCAA ได้มากที่สุด และ กรด DCAA, MBAA, DBAA และ TCAA ตามลำดับ ส่วน A-HMS จะดูดซับกรด DBAA ได้สูงสุด รองลงมาคือ กรด MCAA, MBAA, DCAA และ TCAA ตามลำดับ และเมื่อใช้ A3M7 เป็นสารตัวกลางดูดซับ พบว่า ยังคงดูดซับกรด MCAA ได้สูงที่สุด และดูดซับกรด DCAA, DBAA, MBAA และ TCAA ตามลำดับ สำหรับกรณีของ A5M5 และ A7M3 จะดูดซับกรด DBAA ได้สูงที่สุด ตามด้วย กรด MCAA, DCAA, MBAA และ TCAA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า กรด MCAA ถูกดูดซับได้มาก หากจัดกลุ่ม เป็นกลุ่มของกรดคลอโรอะซีติก

จะพบว่า HMS และ Ti-HMS จะดูดซับกรด MCAA ได้มากที่สุด รองลงมา คือ DCAA และ TCAA ตามลำดับ สังเกตได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะเรียงลำดับมากขึ้นเป็นไปตามจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของกรดฮาโลอะซิติก เช่นเดียวกันกับกลุ่มของกรดโบรโมอะซิติก HMS และ Ti-HMS สามารถดูดซับ MBAA ได้มากกว่า DBAA เช่นกัน จึงอาจบอกได้ว่า ความสามารถในการคัดเลือกในการดูดซับ ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของกรดฮาโลอะซิติก

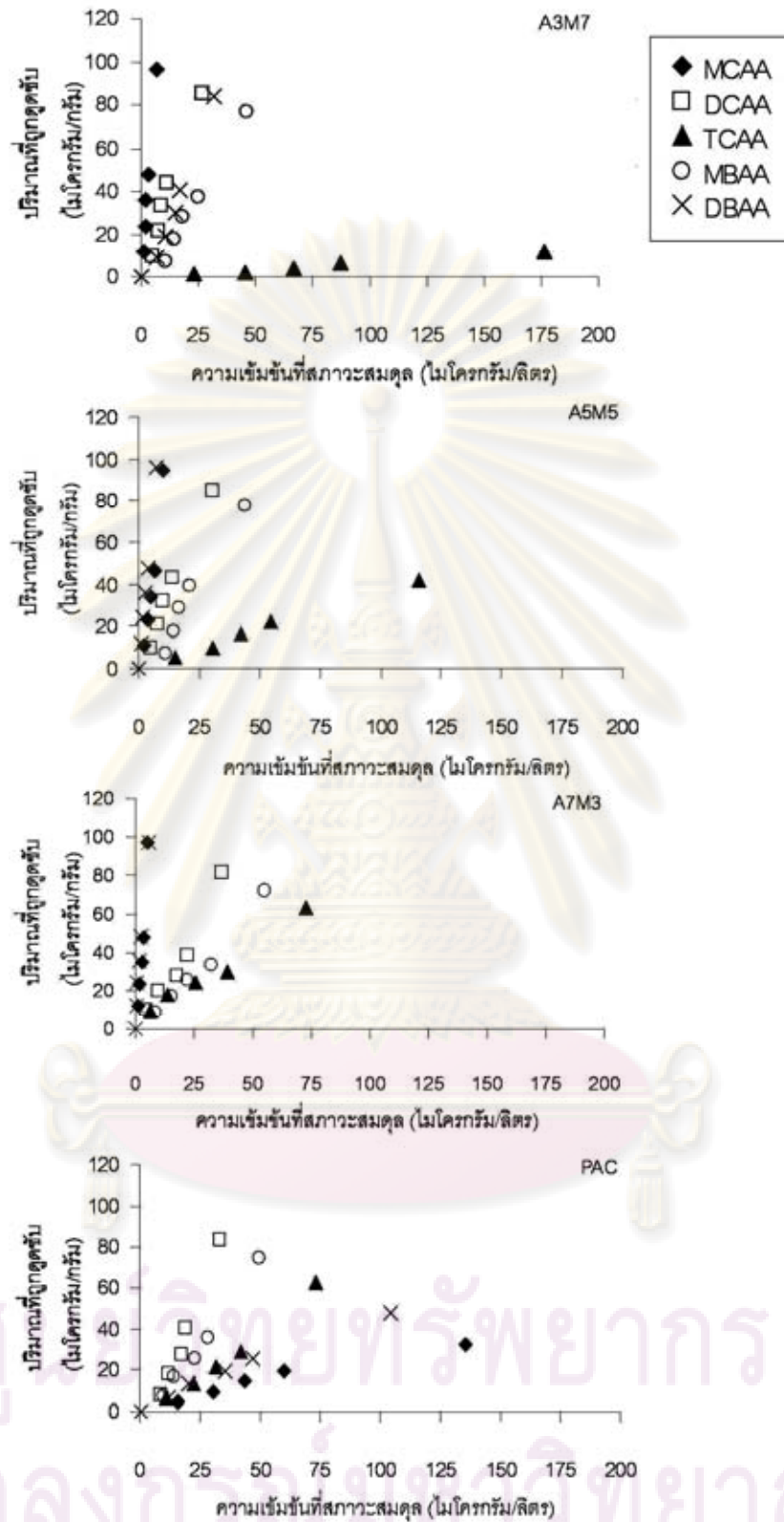
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรด MCAA และ MBAA ซึ่งมีธาตุฮาโลเจนอยู่ 1 อะตอมเท่ากัน จะเห็นว่า HMS และ Ti-HMS สามารถดูดซับกรด MCAA ได้ดีกว่า อาจเพราะคลอรีนมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า และมีขนาดเล็กกว่าโบรมีน นอกจากนี้กรด MCAA ยังมีค่า pKa ต่ำกว่ากรด MBAA ซึ่งค่า pKa จะบ่งชี้ถึงความสามารถในการละลายของสารต่างๆ หากมีค่า pKa ต่ำหมายถึง สารนั้นจะละลายน้ำได้ดี แยกตัวได้มาก ทำให้มีโอกาสที่จะถูกดูดซับโดยพื้นผิวที่มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย กรด MCAA จึงถูกดูดซับด้วย HMS และ Ti-HMS ได้มากกว่ากรด MBAA แต่เมื่อพิจารณาการดูดซับกรด TCAA ที่มีค่า pKa น้อยที่สุดแต่กลับถูกดูดซับได้น้อยกว่า อาจเนื่องมาจากกรด TCAA มีคลอรีนอยู่ในโมเลกุลถึง 3 อะตอม ซึ่งอะตอมของคลอรีนนั้น อาจทำให้ความเป็นขั้วของกรด TCAA เพิ่มขึ้น กรด TCAA ถูกยับยั้งด้วยไฮโดรเนียมไอออนในน้ำ จึงทำให้กรด TCAA ถูกดูดซับได้น้อยลง เพราะไม่สามารถแข่งขันกับกรดฮาโลอะซิติกชนิดอื่นได้ ส่งผลให้สามารถละลายน้ำได้ดี และปัจจัยเนื่องจากความเป็นขั้วนี้มีผลมากกว่าการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของมีโซพอร์ซิลิกาเกต กรด TCAA จึงถูกดูดซับได้ต่ำกว่ากรดฮาโลอะซิติก ชนิดอื่น

นอกจากนี้ ความเกะกะของโครงสร้างของกรดฮาโลอะซิติกชนิดต่างๆ อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยกรด DBAA ซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงสุด และกรด TCAA ที่มีมวลโมเลกุลค่อนข้างสูงเช่นกันและมีอะตอมของคลอรีน 3 อะตอม จะถูกดูดซับได้น้อยกว่ากรดฮาโลอะซิติกชนิดอื่น แต่เมื่อดูดซับกรด DBAA ด้วยมีโซพอร์ซิลิกาเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโน จะทำให้ A-HMS, A5M5 และ A7M3 มีความสามารถในการดูดซับกรด DBAA เพิ่มขึ้น อาจเพราะผลมาจากแรงประจุที่เด่นชัดมากกว่า ส่วน M-HMS และ A3M7 ยังคงดูดซับกรด MCAA ได้สูงที่สุด และความสามารถในการคัดเลือกในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> แต่ละชนิด ยังเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณีการดูดซับโดย HMS และ Ti-HMS





รูปที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำกลั่น ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ 25±2°C



รูปที่ 4.18 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำกลั่น ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิเท่ากับ 25±2°C

สำหรับความสามารถในการดูดซับของ PAC พบว่า PAC ดูดซับกรด DCAA ได้ดีที่สุด รองลงมาคือกรด MBAA, TCAA, DBAA และ MCAA ตามลำดับ ซึ่งจากลำดับของความสามารถในการดูดซับด้วย PAC ดังกล่าว ไม่พบความสัมพันธ์ใดที่บ่งบอกได้ว่า PAC มีสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> จึงอาจกล่าวได้ว่า มีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ มีสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> แต่ละชนิด โดยขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของ HAA<sub>5</sub>

และหากเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> แบบเดี่ยว และแบบผสม จะพบว่า ความสามารถในการดูดซับกรด MCAA, DCAA, MBAA และ DBAA ที่อยู่ในสารละลายผสมกรด HAA<sub>5</sub> ของ HMS จะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับกรด TCAA กลับลดลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับกรณีดูดซับกรด TCAA เพียงชนิดเดียว อาจเป็นเพราะเมื่อสารละลายกรด HAA<sub>5</sub> อยู่ร่วมกัน จะเกิดการแข่งขันในการดูดซับบนพื้นผิวของมีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ อีกทั้งกรด TCAA ยังมีอะตอมของธาตุฮาโลเจนถึง 3 อะตอม มีความเกะกะของโครงสร้างมาก จึงถูกดูดซับได้น้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับกรวดดูดซับแบบเดี่ยว กรวด TCAA ยังถูกดูดซับลดลง

และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> รวม ของมีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ในการดูดซับแบบผสมที่ความเข้มข้นหนึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> แบบผสมของมีไฮพอร์สซิลิเกตทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นจากการดูดซับแบบเดี่ยว อาจบ่งชี้ได้ว่า มีไฮพอร์สซิลิเกตแต่ละชนิดสามารถดูดซับ HAA<sub>5</sub> ได้เพิ่มขึ้นอีกเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งต่างจากกรณี PAC พบว่า ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> รวมนั้น ลดลงจากการดูดซับแบบเดี่ยว แสดงให้เห็นว่า เมื่อ PAC ดูดซับ HAA<sub>5</sub> อาจเกิดการแย่งพื้นที่ในการดูดซับทำให้ความสามารถของ PAC ที่ลดลง ซึ่งการแย่งพื้นที่ในการดูดซับนี้ไม่เกิดในกรณีเมื่อใช้มีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา เพราะความสามารถในการดูดซับ HAA<sub>5</sub> ยังคงมีอยู่สูง

จากผลการทดลองข้างต้น อาจบ่งชี้ได้ว่ามีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ มีสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ไม่ได้นัก แต่สามารถคัดเลือกดูดซับกรดฮาโลอะซิติกที่มีอะตอมของธาตุฮาโลเจนน้อยได้ดีกว่า และพบว่ายังมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าและไม่เกิดการแย่งพื้นที่ในการดูดซับของกรด HAA<sub>5</sub> แต่ละชนิด ต่างจาก PAC

#### 4.4.2 กรณีใช้น้ำประปา

จากการทดลอง เพื่อศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ของมีไฮพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยใช้น้ำประปาจริง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า HMS,

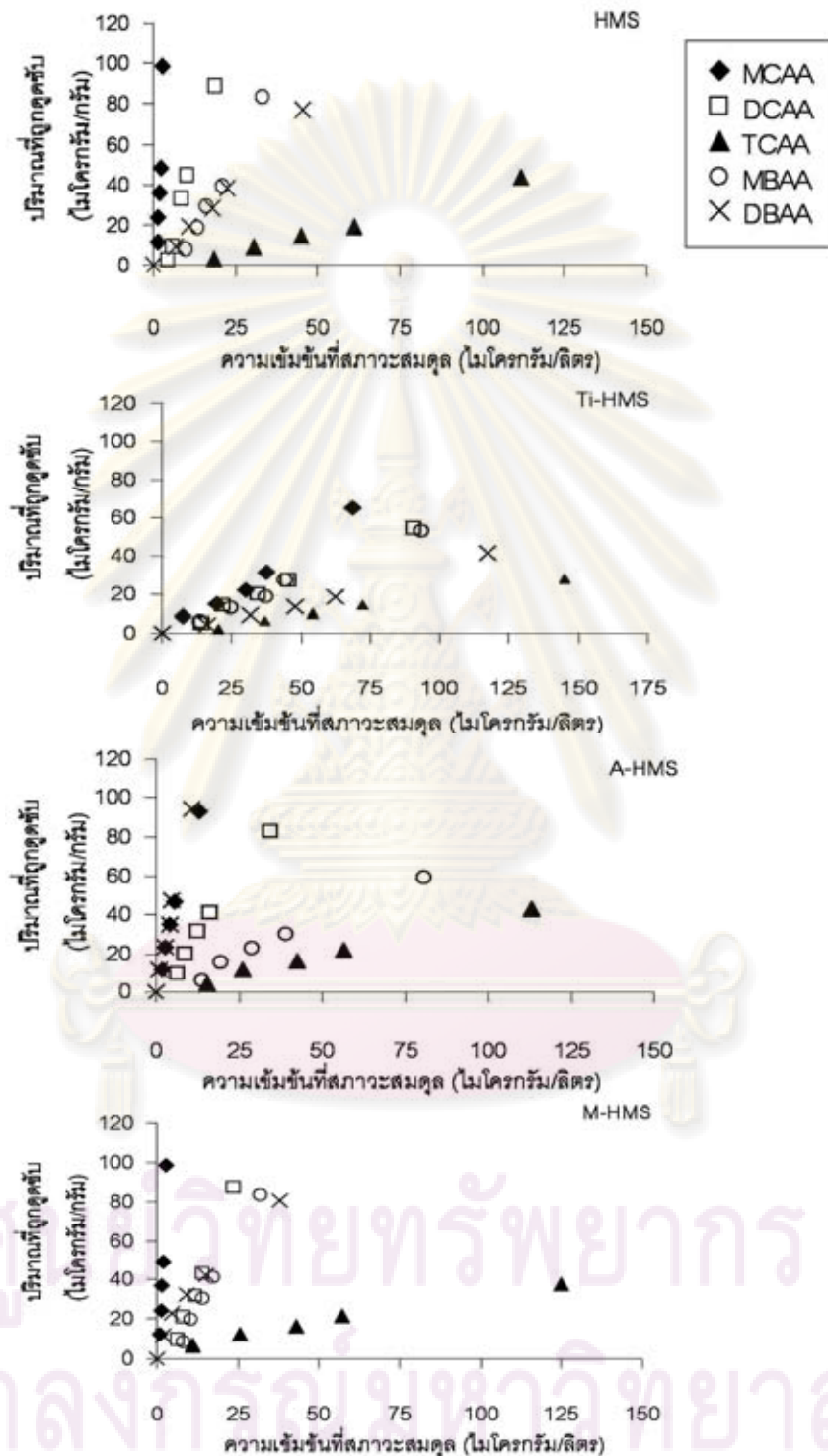
Ti-HMS และ M-HMS สามารถดูดซับกรด MCAA ได้สูงสุด รองลงมา คือ กรด DCAA, MBAA, DBAA และ TCAA ตามลำดับ และมีโซฟอรัลซิติลิกेटที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชันได้แก่ A-HMS สามารถดูดซับกรด DBAA ได้ดีที่สุดในรองลงมาคือ กรด MCAA, DCAA, MBAA และ TCAA เช่นเดียวกับ A5M5 และ A7M3 ส่วน A3M7 มีความสามารถในการดูดซับ MCAA สูงสุดเช่นกัน ตามด้วยกรด DCAA, DBAA, MBAA และ TCAA จะเห็นว่า มีโซฟอรัลซิติลิกेटที่ต่อติดหมู่อะมิโน ได้แก่ A-HMS, A5M5 และ A7M3 สามารถดูดซับกรด DBAA ได้เพิ่มมากขึ้น อาจเพราะประจุบวกบนพื้นผิวจากการต่อติดหมู่อะมิโน จากการทดลองพบว่า การคัดเลือกการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของกรด HAA<sub>5</sub> ชนิด และขนาดของธาตุฮาโลเจน พันธะไฮโดรเจน และความเกาะเกาะของโครงสร้างเช่นเดียวกันกับกรณีน้ำกลั่น

ซึ่งผลการทดลองสำหรับกรณีใช้น้ำประปาจริง มีโซฟอรัลซิติลิกेटมีลำดับความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> เช่นเดียวกับกรณีใช้น้ำกลั่น แต่ในกรณีเมื่อใช้ PAC เป็นสารตัวกลางดูดซับ ลำดับความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปจากกรณีใช้น้ำกลั่น โดย PAC สามารถดูดซับกรด DBAA ได้มากที่สุด ตามด้วย MBAA, MCAA, DCAA และ TCAA ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า มีโซฟอรัลซิติลิกेटชนิดต่างๆ สามารถดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปาจริงได้ และความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลของ HAA<sub>5</sub> ชนิด และขนาดของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของกรด HAA<sub>5</sub> และไอออนต่างๆในน้ำประปาไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ของมีโซฟอรัลซิติลิกेटชนิดต่างๆ

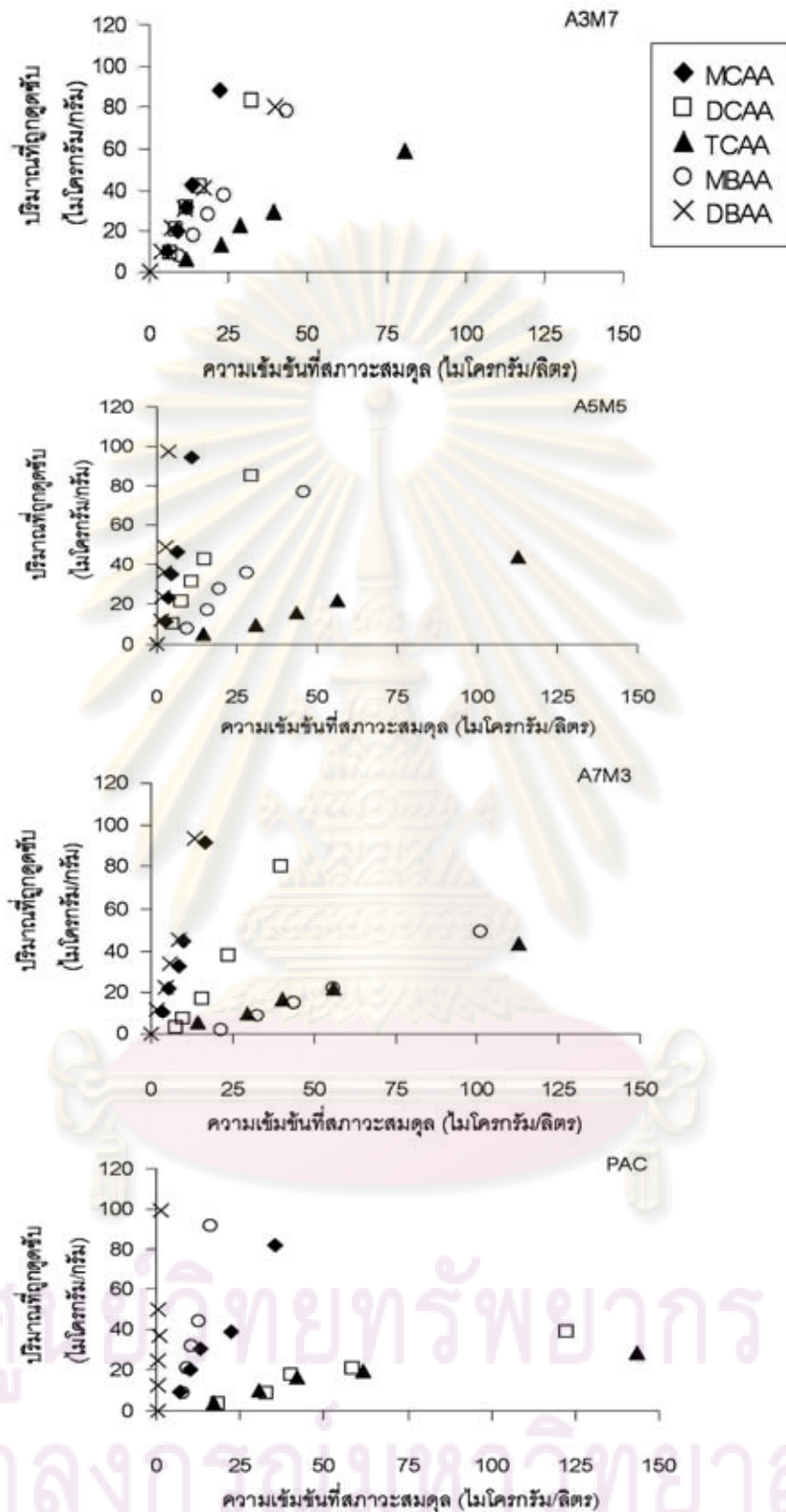
อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> รวมของ PAC ที่ความเข้มข้นหนึ่ง กลับพบว่า ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> รวม ลดลงจากการดูดซับแบบเดี่ยว เช่นเดียวกับการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> แบบผสมในกรณีใช้น้ำกลั่น จากความสามารถในการดูดซับที่ลดลงนี้ จึงบอกได้ว่า เมื่อใช้ PAC เป็นสารตัวกลางดูดซับ จะเกิดการแย่งพื้นที่ผิวในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากไอออนต่างๆในน้ำประปา

ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ผสม ของมีโซฟอรัลซิติลิกेटชนิดต่างๆไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักจากกรณีแบบเดี่ยวและแบบผสมในน้ำกลั่น อาจกล่าวได้ว่า ไอออนในน้ำประปาไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ผสม ของมีโซฟอรัลซิติลิกेटชนิดต่างๆ มีเพียงกรณี PAC ที่ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ลดลงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และแม้สมบัติการคัดเลือกของมีโซฟอรัลซิติลิกेटนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของกรด HAA<sub>5</sub> และมวลโมเลกุล แต่พบว่าเมื่อใช้น้ำประปาจริง มีโซฟอรัลซิติลิกेटชนิดต่างๆ

ยังมีสมบัติในการคัดเลือกไม่ได้นัก หากแต่มีความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> รวมสูงกว่า PAC



รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC โดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25±2°C



รูปที่ 4.19 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5, A7M3 และ PAC โดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25±2°C

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก 5 ชนิด ด้วยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยทำการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกต และทำการปรับปรุงพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตด้วยการแทนที่ด้วยธาตุโลหะไททานเนียม และการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ทั้งแบบเดี่ยวและแบบคู่ จากนั้นจึงทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก ไอโซเทอร์มในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก และ สมบัติในการคัดเลือกการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก 5 ชนิด แล้วเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

จากการสังเคราะห์มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ ได้นำมีโซพอร์สชนิดต่างๆนั้นไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่า จากสเปกตรัม XRD ที่ไม่เด่นชัดในช่วงที่บ่งชี้ถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกของ มีโซพอร์สซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่อะมิโน จึงบอกได้ว่า การต่อติดหมู่อะมิโน จะทำให้โครงสร้างผลึกของมีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโนเกิดการเสียหาย นอกจากนี้การต่อติดหมู่อะมิโนยังทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงอีกด้วย เป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโน สำหรับขนาดของรูพรุนนั้นพบว่า มีโซพอร์สซิลิเกตที่สังเคราะห์ขึ้น มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลาง แต่พบว่าการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์นั้นจะมีผลต่อขนาดของรูพรุนโดยจะทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น จากการวิเคราะห์ FT-IR พบว่ามีโซพอร์สซิลิเกตทุกชนิดจะมีสเปกตรัมของ O-H Stretching ที่ความยาวคลื่น  $3400 - 3500 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่า บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตทุกชนิดจะมีหมู่ซิลานอลอยู่ โดยจะเห็นได้ชัดในกรณีของ HMS ส่วน A-HMS จะพบ N-H Stretching สามารถบอกถึงการมีอยู่ของหมู่อะมิโนได้ แต่ในการวิเคราะห์ FT-IR นั้น ไม่สามารถบ่งชี้การมีอยู่ของหมู่เมอร์แคปโตได้ อย่างไรก็ตามสามารถวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์เพื่อยืนยันการมีอยู่ของหมู่อะมิโน และเมอร์แคปโตได้อีกด้วย ในการหา  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆพบว่า HMS, Ti-HMS, A-HMS, M-HMS, A3M7, A5M5 และ A7M3 มีค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  เท่ากับ 5.5, 7.4, 9.5, 6.2, 6.7, 8.6 และ 8.3 ตามลำดับ ส่วน PAC มีค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  เท่ากับ 9.5 มีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโนจะมีค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  สูงกว่า HMS ในขณะที่ M-HMS นั้นจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวหากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 4 – 6

การศึกษาลจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ พบว่า HMS สามารถดูดซับกรด MCAA ได้รวดเร็วที่สุด PAC จะดูดซับกรด DCAA, TCAA และ

DBAA ได้รวดเร็วที่สุด ส่วน กรด MBAA นั้น ถูกดูดซับด้วย M-HMS เร็วที่สุด จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) ซึ่งอาจบอกได้ว่า ปฏิกิริยาการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของมีโซพอร์สซิลิเกตทุกชนิด เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว และอาจมีการดูดซับแบบเคมีร่วมอยู่ด้วยในขั้นตอนการดูดซับ

ในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดโดยมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ มีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกนั้น พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ ดังจะเห็นได้จาก M-HMS มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แล้ว กลับพบว่า A-HMS มีความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกทั้ง 5 ชนิดสูง เป็นผลมาจากประจุบนพื้นผิวของ A-HMS การต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตมีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก โดยการต่อติดหมู่อะมิโน จะทำให้พื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตมีความชอบน้ำ และมีสภาพประจุเป็นบวก A-HMS จึงสามารถดูดซับกรดฮาโลอะซิติกที่มีสภาพประจุเป็นลบได้ดีด้วยแรงทางไฟฟ้า และสัดส่วนที่แตกต่างกันของหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิดบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตได้แก่ หมู่อะมิโน และ หมู่เมอร์แคปโตนั้น ก็มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเช่นกัน โดยหมู่อะมิโนจะช่วยเพิ่มสภาพความเป็นประจุบวกบนพื้นผิว ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจึงบอกได้ว่า แรงทางไฟฟ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกมากกว่าปัจจัยทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ พื้นที่ผิว หรือ ขนาดของรูพรุนของมีโซพอร์สซิลิเกต นอกจากนี้หมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกต ยังส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก พันธะไฮโดรเจน ความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำอาจเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้โครงสร้างที่แตกต่างกันของกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิด ยังส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดย กรดฮาโลอะซิติกที่มีจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนน้อยกว่าจะถูกดูดซับได้มากกว่า และกรดคลอโรอะซิติกจะถูกดูดซับได้มากกว่ากรดโบรโมอะซิติก เนื่องจากอะตอมของคลอรีนมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของโบรมีน

และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายกรดฮาโลอะซิติก พบว่า ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับค่า  $pH_{zpc}$  ของสารตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งสามารถบอกได้ว่า แรงทาง



ไฟฟ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก และรวมไปถึงพันธะไฮโดรเจนก็มีผลเช่นกัน

สำหรับสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ พบว่า มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆจะเลือกดูดซับกรดฮาโลอะซีติกที่มีมวลโมเลกุลน้อย และเลือกดูดซับเรียงลำดับตามจำนวนธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลของกรดฮาโลอะซีติก นอกจากนี้กลุ่มของกรดคลอโรอะซีติกยังถูกดูดซับได้ดีกว่ากลุ่มของกรดโบโรโมอะซีติก แต่มีโซพอร์สซิลิเกตที่ต่อติดหมู่อะมิโนจะมีความสามารถในการดูดซับกรด DBAA เพิ่มมากขึ้น และเมื่อทำการทดลองในน้ำประปาจริง พบว่าไอออนในน้ำประปา ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก โดยใช้มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับกรณีที่ใช้ น้ำกลั่น แต่เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงดูดซับกรดฮาโลอะซีติกผสมทั้ง 5 ชนิด พบว่า ความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกผสมโดยรวมลดลง เนื่องจากเกิดการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

แม้ว่าความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกแบบเดี่ยวของถ่านกัมมันต์ชนิดผงยังคงสูงกว่ามีโซพอร์สซิลิเกต แต่อย่างไรก็ตาม มีโซพอร์สซิลิเกต และมีโซพอร์สซิลิเกตที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน สามารถลดการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ และมีความสามารถในการดูดซับกรด HAA<sub>5</sub> โดยรวมสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ PAC ดังนั้น เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดกรดฮาโลอะซีติกในกระบวนการผลิตน้ำดื่มหรือน้ำประปา การนำมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆไปใช้ร่วมกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง อาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาความเป็นได้ในการนำมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆไปประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกนั้น อาจใช้ควบคู่กับถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ยังคงมีความสามารถในการดูดซับมลสารอื่นสูงเพื่อลดปัญหาการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับมลสารโดยรวมสูงขึ้น อีกทั้งมีโซพอร์สซิลิเกตยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ทำให้ลดปัญหาสารพิษที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการเผาเพื่อนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามควรมีวิธีในการจัดการมลสารที่ถูกดูดซับที่ถูกสกัดออกมารวมกับตัวทำละลาย โดยใช้วิธีตามมาตรฐานการกำจัดสารพิษเพื่อลดความเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต นอกจากนี้อาจมีการศึกษาวิจัยเพื่อใช้มีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ชนิดอื่นเพิ่มเติม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรีสุดา แซ่เอ็ง และ วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา. 2550. การสังเคราะห์ Amine-Functionalized Mesoporous Silica Materials ด้วยวิธี One-Pot Synthesis สำหรับดูดซับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 17.

### ภาษาอังกฤษ

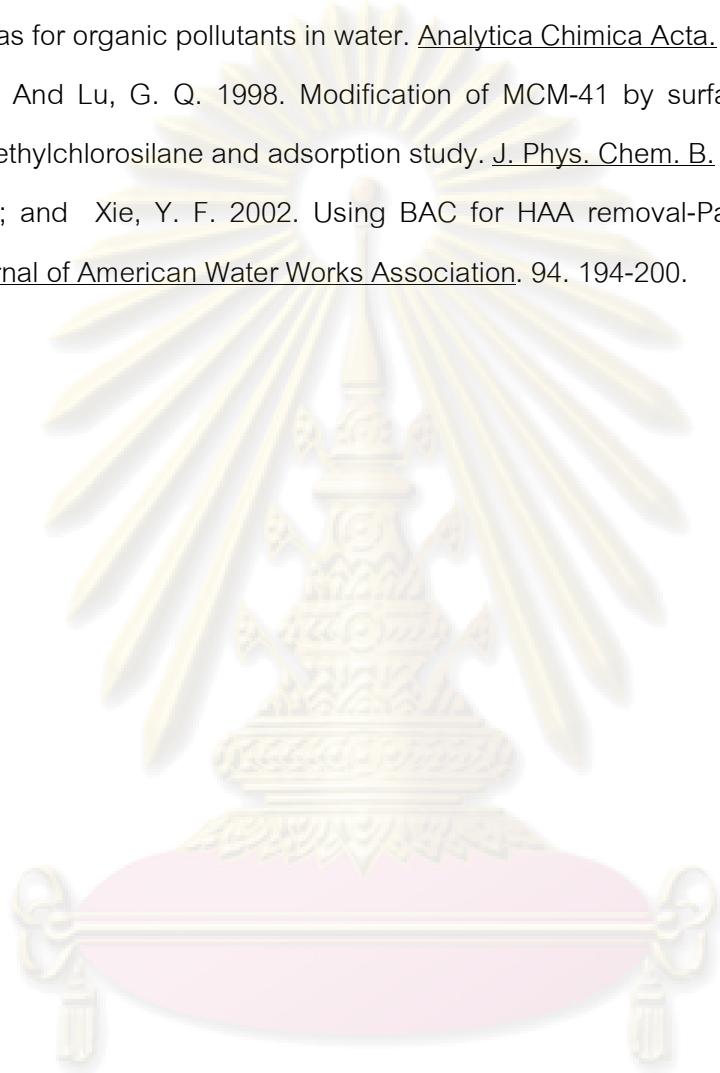
- Ahn, W. S.; Lee, D. H.; Kim, T. J.; Kim, J. H.; Seo, G.; and Ryoo, R. Post-Synthetic preparations of titanium-containing mesopore molecular sieves . Applied Catalysis 1999: 39-49.
- Babi, K. G.; Koumenides, K. M.; Nikolaou, A. D.; Makri, C. A.; Tzoumerkas, F. K.; and Lekkas, T. D. 2007. Pilot study of removal of THMs, HAAs and DOC from drinking water by GAC Adsorption. Desalination. 210: 215-224
- Beck J.S.; Vartuli C.; Roth W.J.; Leonowicz M.E.; Kresge C.T.; Schmitt K.D.; Chu C.T-W.; Olson D.H.; Sheppard E.W.; McCullen S.B.; Higgins J.B.; and Schlenker J.L. 1992. A new Family of Mesoporous Molecular Sieves Prepared with Liquid Crystal Templates. J. Am. Chem. Soc. 114: 10834-10843.
- 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.

- Ghouthi, 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, Y.P.; Cao, H.B.; and Zhang, Y. 2007. Reductive dehalogenation of haloacetic acids by hemoglobin-loaded carbon nanotube electrode. Water Research. 41: 197-205.
- 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.
- Newalker, 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.
- Nissinen, T. K.; Miettinen, I. T.; Martikainen, P. J.; and Vartiainen, T. 2002. Disinfection by-products in finish drinking water. Chemosphere. 48: 9-20.

- 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.
- Ratasuk, C.; Kositanont, C.; and Ratanatamsakul, C. 2008. Removal of Haloacetic acids by ozone and biologically active carbon. Science Asia. 34: 293-298.
- Ratasuk, C.; Ratanatamskul, C.; and Ratasuk, N. 2009. Removal of haloacetic acids by nanofiltration. Journal of Environmental Science. 21: 96-100.
- Renzo, F. D.; Testa, F.; Chen, J. D.; Cambon, H.; Galarnau, 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.
- Schulthess, C. P.; and Spark, D. L. 1986. Backtitration technique for proton isotherm modeling of oxide surfaces. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1406-1411.
- Stein A.; Melde B.J.; and Schroden R.C. 2000. Hybrid Inorganic-Organic Mesoporous Silicates - Nanoscopic Reactors Coming of Age. Advanced Materials 12: 1403-1419.

- 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. Chem. Mater. 8: 2068-2079.
- Tuel, A. 1999. Modification of mesoporous silicates by incorporation of heteroelements in the framework. Microporous and Mesoporous Materials. 27: 151-169.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1995. Method 552.2: Determination of haloacetic acids and dalapon in drinking water by liquid-liquid extraction. Derivation and gas chromatography with electron capture detector. Cincinnati, Ohio.
- 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.
- Water Treatment Engineering and Research Group. 2003. Haloacetic acids fact sheet [Online]. Available from: [http://www.usbr.gov/pmts/water/media/pdfs/DBP%20HAA s.pdf](http://www.usbr.gov/pmts/water/media/pdfs/DBP%20HAA%20s.pdf) [2005, December 25]
- Xie, Y. 2001. Analyzing haloacetic acids using gas chromatography/mass spectrometry. Water Research. 6: 1599-1602.
- Yang, C. 2003. Basic Functionalization of Hexagonal Mesoporous Silica. Chinese Chemical Letter. 14: 96-99.
- Yue, Y. H.; Sun, Y.; Xu, Q.; and Gao, Z. 1998. Catalysis activities and properties of AHMS mesoporous molecular sieves. Applied Catalysis. 175: 131-137.

- Yoshitake, H.; Koiso, E.; Horie, H.; and Yoshimura, H. 2005. Polyamine-functionalized mesoporous silicas: preparation, structural analysis and oxyanion adsorption. Microporous and Mesoporous Materials. 85: 183-194.
- Zhao, Y. X.; Ding, M. Y.; and Chen, D. P. 2005. Adsorption properties of mesoporous silicas for organic pollutants in water. Analytica Chimica Acta. 542: 193-198.
- Zhao, X. S. And Lu, G. Q. 1998. Modification of MCM-41 by surface functional with trimethylchlorosilane and adsorption study. J. Phys. Chem. B. 102: 1556-1561.
- Zhou, H. J.; and Xie, Y. F. 2002. Using BAC for HAA removal-Part 1: Batch study. Journal of American Water Works Association. 94. 194-200.




ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก  
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของมิโซพอร์สซิลิเกต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.1 ปริมาณไนโตรเจนของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ

สาร ตัวกลาง ดูดซับ	ปริมาณไนโตรเจน (mg)	น้ำหนัก (g)	ปริมาณ ไนโตรเจน ทั้งหมด (g/g)	% ไนโตรเจน
A3M7	0.7329	0.1200	0.0061	0.6108
A5M5	0.9249	0.1200	0.0077	0.7708
A7M3	1.4310	0.1100	0.0130	1.3009
A-HMS	1.5531	0.1100	0.0141	1.4119

ตารางที่ ก.2 ปริมาณซิลเฟอร์ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ

สารตัวกลาง ดูดซับ	มวลของซิลเฟอร์ (g)	น้ำหนัก (g)	ปริมาณ ซิลเฟอร์ ทั้งหมด (g/g)	% ซิลเฟอร์
M-HMS	0.0105	0.1057	0.0992	9.9243
A3M7	0.0072	0.1008	0.0709	7.0933
A5M5	0.0064	0.1076	0.0599	5.9851
A7M3	0.0033	0.1015	0.0326	3.2640

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ PAC

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	9.78	-21.0795
2	9.63	-7.6424
3	9.51	-3.3454
4	9.47	-1.0167
5	9.38	1.1597
6	9.30	2.8946
7	9.21	4.6074
8	9.08	8.4962
9	8.30	19.7073

ตารางที่ ก.4 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ HMS

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	3.39	20.6894
2	3.6	8.8539
3	3.78	7.3326
4	4.06	2.1769
5	4.37	1.5538
6	4.99	-0.0495
7	5.42	-0.8257
8	5.97	-2.0218
9	6.7	-8.4018
10	7.24	-20.5957
12	8.23	-33.4557
13	8.56	-54.5800
14	8.94	-115.0719

ตารางที่ ก.5 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ Ti-HMS

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	6.79	47.251
2	7.40	23.583
3	7.42	11.755
4	7.63	2.259
5	7.71	-2.541
6	7.80	-12.219
7	8.02	-23.902
8	8.24	-47.253
9	7.39	-0.069

ตารางที่ ก.6 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A-HMS

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	9.67	-21.6759
2	9.60	-7.6125
3	9.58	-2.9676
4	9.57	-0.6363
5	9.53	1.6316
6	9.51	3.5461
7	9.50	5.3390
8	9.38	9.0818
9	9.38	19.9328

ตารางที่ ก.7 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ M-HMS

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	8.63	-24.0164
2	7.56	-9.5771
3	7.01	-4.7963
4	6.62	-2.3749
5	6.14	-0.0338
6	4.96	1.4146
7	4.40	1.9738
8	3.97	2.5858
9	3.45	2.3544

ตารางที่ ก.8 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A3M7


ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	8.56	-24.2884
2	7.85	-9.4485
3	7.39	-4.7962
4	7.09	-2.4298
5	6.77	-0.0053
6	6.62	1.9320
7	6.41	3.8733
8	6.21	7.7682
9	5.13	18.8340

ตารางที่ ก.9 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A5M5

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	9.37	-23.4226
2	9.17	-8.9258
3	9.11	-4.3742
4	9.09	-1.8768
5	9.03	0.5108
6	8.90	2.3656
7	8.81	4.2612
8	8.87	8.1223
9	8.57	19.7511

ตารางที่ ก.10 การหาค่าประจุบนพื้นผิวของ A7M3

ตัวอย่าง	pH	ค่าประจุบนพื้นผิว (C/g)
1	8.76	-23.7093
2	8.52	-9.4174
3	8.37	-4.7039
4	8.38	-2.3164
5	8.3	0.0938
6	8.25	2.0308
7	8.18	3.9713
8	8.08	7.8548
9	7.68	19.3987



ภาคผนวก ข  
การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด MCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของกรด MCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ (ppb)							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	100.11	99.82	98.39	109.37	97.12	93.33	99.97	102.07
0.25	90.58	86.39	93.58	104.21	80.84	82.76	84.82	93.07
0.5	82.41	84.51	88.35	94.38	75.92	73.46	70.45	60.82
1	78.64	73.53	74.55	83.36	63.50	65.10	67.78	51.53
2	61.07	58.05	57.27	72.38	56.91	50.10	59.76	45.59
4	60.79	44.91	42.71	68.56	55.43	44.75	56.19	42.98
6	45.35	40.79	38.36	63.49	43.64	27.93	47.82	37.46
12	28.87	30.24	26.31	54.03	31.22	26.77	41.56	32.47
18	14.08	28.35	16.36	40.37	23.46	18.10	35.67	28.82
24	18.02	29.01	14.87	38.66	20.41	13.99	36.25	25.66
30	14.56	29.77	15.11	39.93	22.85	13.75	35.81	26.17
36	14.69	29.85	14.51	40.71	23.23	15.34	33.94	25.95
48	16.45	29.71	14.92	40.27	23.03	13.47	35.49	25.64

ตารางที่ ข.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของกรด DCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ (ppb)							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	106.92	99.02	106.92	106.92	106.92	106.92	106.92	106.92
0.25	99.82	98.81	105.47	101.26	102.45	102.45	100.05	54.25
0.5	95.35	95.62	103.20	100.62	98.05	98.58	94.38	39.28
1	91.90	84.51	95.67	100.19	97.20	94.16	93.45	37.96
2	91.65	78.28	95.22	92.82	88.72	93.77	87.26	37.94
4	91.59	69.26	91.68	90.17	85.22	89.31	89.99	35.94
6	90.29	71.32	90.40	88.22	85.06	85.84	90.02	36.63
12	87.88	72.80	94.32	87.88	87.63	90.01	83.24	37.12
18	83.33	71.89	95.41	87.05	84.34	91.22	91.75	30.31
24	82.64	71.14	95.32	91.54	82.03	92.65	90.09	29.72
30	83.35	72.87	95.02	90.28	83.75	91.46	90.08	30.23
36	-	72.05	-	90.05	83.44	91.27	90.44	29.46
48	87.86	72.42	95.13	90.16	86.21	91.75	91.75	28.76



ตารางที่ ข.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของกรด TCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ (ppb)							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	109.87	98.35	98.35	103.22	95.85	101.68	102.81	96.72
0.25	91.74	103.67	103.67	85.64	79.87	92.25	92.01	67.34
0.5	84.53	96.25	96.25	80.12	69.075	81.95	85.37	53.64
1	73.58	95.06	95.06	72.51	63.83	75.96	82.43	47.01
2	65.03	86.72	86.72	61.73	59.79	73.63	76.84	47.26
4	59.74	85.91	85.91	58.99	55.80	67.26	72.10	42.60
6	55.67	80.57	80.56	51.50	48.55	61.20	65.66	42.99
12	40.82	76.95	76.95	47.06	44.78	53.70	53.33	41.99
18	38.30	74.26	74.26	40.62	41.43	48.36	52.59	39.39
24	38.14	68.93	68.93	37.43	39.87	51.87	55.63	36.95
30	36.87	70.86	70.86	33.96	39.54	55.33	54.89	37.70
36	40.34	68.89	68.89	36.42	37.33	53.50	57.65	39.09
48	38.36	72.24	72.24	34.19	39.87	54.91	58.97	37.45

ตารางที่ ข.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด MBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของกรด MBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ (ppb)							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	99.92	99.36	101.07	102.11	108.40	100.36	95.75	103.51
0.25	96.62	96.21	96.81	86.70	113.97	94.49	80.54	81.09
0.5	84.02	96.38	90.41	74.03	90.83	91.17	78.90	71.99
1	80.41	91.78	79.72	72.75	87.46	81.13	66.30	55.74
2	67.83	82.91	77.78	66.87	84.79	77.01	63.51	55.64
4	65.09	74.38	70.08	59.15	76.72	62.43	61.81	48.69
6	58.92	70.89	67.44	53.82	70.27	55.86	55.77	44.12
12	55.26	65.51	57.72	43.99	69.36	48.43	49.28	40.17
18	45.44	61.22	46.67	29.25	54.29	36.98	35.58	35.91
24	37.16	57.61	38.14	27.92	44.77	34.51	36.22	34.28
30	36.54	58.86	42.75	28.62	45.52	32.91	34.34	34.75
36	36.44	54.15	36.51	31.81	43.64	32.29	36.68	34.12
48	36.84	54.97	38.96	31.47	44.52	32.43	36.95	34.75

ตารางที่ ข.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับกรด DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของกรด DBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ (ppb)							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	104.35	103.72	103.54	101.08	104.05	104.24	105.93	100.35
0.25	102.14	101.88	101.24	103.03	104.73	98.60	107.83	92.96
0.5	102.03	108.54	100.16	98.95	101.37	96.64	100.01	90.40
1	96.11	103.06	103.11	96.78	96.07	95.18	84.25	77.31
2	81.38	91.11	82.31	85.82	90.24	95.11	81.27	73.30
4	88.55	87.69	71.10	87.80	94.97	89.63	80.00	68.39
6	77.37	84.50	69.76	69.45	86.60	79.90	70.62	55.76
12	73.14	76.43	62.63	77.61	88.04	75.34	74.94	52.65
18	59.93	75.78	58.94	66.32	67.50	66.58	71.76	46.85
24	56.61	74.87	49.34	65.37	63.11	70.90	57.81	43.47
30	56.78	74.90	49.39	64.58	63.63	70.13	57.61	43.15
36	57.22	73.46	48.91	64.98	62.44	71.71	57.11	43.32
48	59.17	74.47	48.43	64.67	63.84	72.11	56.32	43.26

ตารางที่ ข.6 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MCAA ของมิโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด MCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.35	-0.35	-0.34	-0.34	-0.34	-0.61	-0.48	-0.33
25	10.21	10.09	10.98	10.90	10.74	10.48	9.67	10.72
50	21.07	18.58	22.48	22.10	21.67	21.32	19.14	21.78
75	32.35	26.75	34.15	32.54	32.51	31.74	26.98	32.83
100	44.50	34.81	45.25	42.54	44.02	41.89	33.80	43.56
200	82.95	63.90	87.60	90.04	86.63	81.61	63.39	88.52

ตารางที่ ข.7 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด DCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	0.13	0.34	0.19	0.01	0.39	0.14	0.15	-0.34
25	7.76	4.77	6.64	6.26	3.85	4.84	5.53	10.56
50	13.34	10.15	11.71	13.91	6.76	10.81	9.11	19.17
75	21.64	13.83	16.34	18.66	13.68	17.73	15.21	28.18
100	27.53	18.16	24.33	22.77	16.74	21.27	21.99	37.09
200	48.74	33.49	52.81	39.81	38.57	43.90	39.39	76.59

ตารางที่ ข.8 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด TCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.08	-0.06	-0.07	0.12	-0.30	-0.07	0.00	0.04
25	8.85	2.35	5.70	9.22	9.03	5.76	3.20	10.91
50	15.96	6.37	10.77	18.33	16.67	10.85	7.91	20.57
75	25.00	9.34	15.48	25.34	24.35	17.66	13.47	29.44
100	33.23	12.82	21.49	33.38	28.72	21.44	20.64	36.42
200	63.09	30.43	47.53	61.27	58.15	48.28	38.29	75.70

ตารางที่ ข.9 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด MBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.02	-0.05	-0.09	-0.02	-0.02	-0.07	-0.20	-0.12
25	8.32	3.91	7.07	7.70	5.89	8.24	5.72	9.58
50	16.36	11.98	15.75	16.65	13.63	18.11	14.14	19.89
75	24.24	16.68	25.37	25.27	22.61	26.78	23.17	30.95
100	34.87	23.82	34.53	34.58	29.55	34.95	32.81	41.69
200	71.54	46.60	73.88	71.28	58.24	61.14	66.11	86.60

ตารางที่ ข.10 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 7

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด DBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.76	-0.15	-1.02	-1.21	-0.03	-0.16	-0.07	-0.62
25	4.92	2.26	6.93	2.91	3.53	2.83	4.05	10.25
50	9.78	3.84	13.99	6.95	7.10	4.18	10.96	20.11
75	17.19	6.73	17.12	13.64	13.05	6.38	16.41	30.47
100	23.11	11.22	23.63	17.03	15.24	7.43	25.39	40.52
200	40.45	24.38	47.28	41.08	35.76	14.65	49.19	74.44



ตารางที่ ข.11 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MCAA ของมิโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 5

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด MCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.36	-0.55	-0.38	-0.34	-0.70	-0.35	-0.53	-0.01
25	11.19	10.70	10.70	11.04	11.27	10.83	11.29	11.76
50	23.28	22.08	22.56	22.95	22.52	22.88	21.89	23.84
75	34.97	32.36	32.07	35.08	34.11	34.45	32.84	35.11
100	45.21	42.64	43.51	46.47	45.05	44.81	45.27	46.39
200	88.45	88.66	87.76	94.42	90.84	88.94	88.33	92.17

ตารางที่ ข.12 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 5

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด DCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	0.39	-0.50	0.24	0.23	-0.17	-0.17	0.01	0.37
25	7.04	3.63	6.46	7.96	8.06	7.45	6.20	7.53
50	12.02	5.37	9.49	11.05	13.56	16.22	9.30	14.63
75	20.28	9.77	17.04	18.74	18.74	21.78	13.61	26.06
100	26.49	15.54	20.77	21.70	23.03	27.89	18.88	34.10
200	55.02	25.41	46.01	37.80	34.58	45.39	39.35	74.61

ตารางที่ ข.13 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 5

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด TCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	0.04	0.04	-0.03	0.03	-0.04	0.00	-0.03	-0.04
25	11.01	5.88	8.18	6.07	10.04	5.95	6.72	11.21
50	20.88	10.21	12.44	14.25	16.03	14.38	13.48	22.65
75	31.50	12.47	17.81	23.13	24.37	18.15	17.71	34.34
100	39.36	18.35	23.45	28.53	33.52	25.61	23.44	46.52
200	73.78	35.55	40.58	60.39	59.75	44.23	42.82	93.41

ตารางที่ ข.14 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 5

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด MBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02
25	7.72	8.41	8.12	8.01	8.66	7.60	7.79	9.48
50	16.22	15.75	17.37	15.08	15.83	14.97	16.84	19.77
75	25.86	23.27	24.29	22.94	23.46	23.48	24.46	28.44
100	36.79	29.46	31.37	33.44	32.59	34.92	32.54	37.63
200	72.34	54.93	69.43	70.34	62.24	65.02	68.34	80.31

ตารางที่ ข.15 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 5

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด DBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.95	-0.07	-0.66	-0.53	-0.41	-0.21	-0.37	-0.35
25	4.26	2.12	5.91	2.61	2.09	0.96	5.37	8.75
50	9.25	5.24	13.83	4.60	3.34	2.11	11.28	19.36
75	16.31	10.13	21.76	6.52	5.41	2.84	18.57	29.48
100	20.03	11.42	27.92	7.74	7.07	3.19	25.35	39.94
200	33.24	24.69	51.15	13.79	12.98	6.78	55.90	76.82

ตารางที่ ข.16 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MCAA ของมิโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 9

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด MCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.44	-0.37	-0.40	-0.38	-0.33	-0.36	-0.45	-0.29
25	10.47	10.55	10.20	10.97	10.27	7.64	10.68	9.17
50	21.86	22.23	20.64	22.54	21.29	17.93	20.39	20.80
75	32.47	32.97	31.57	33.36	32.01	28.19	31.61	30.38
100	42.30	42.27	41.70	44.41	42.15	38.80	42.01	40.24
200	82.13	80.83	80.51	87.07	81.42	80.93	79.08	83.89

ตารางที่ ข.17 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 9

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด DCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	0.24	-0.01	-0.38	-0.16	0.11	-0.15	-0.04	-0.13
25	3.38	3.08	2.86	5.18	3.71	6.78	5.64	6.10
50	9.33	7.87	9.35	12.59	9.19	9.00	9.79	16.14
75	15.95	13.22	15.40	15.69	13.23	14.95	14.85	20.26
100	24.35	17.01	22.02	21.77	16.66	19.59	19.30	27.99
200	47.69	32.10	43.28	35.59	36.10	35.96	39.66	62.75

ตารางที่ ข.18 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด TCAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 9

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด TCAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.19	-0.01	0.02	-0.04	-0.06	0.08	-0.19	-0.08
25	9.87	4.49	4.34	4.57	7.61	6.43	5.55	10.51
50	30.96	7.08	10.81	12.41	17.06	8.60	8.91	21.02
75	23.27	9.90	16.71	22.17	19.14	12.93	16.91	31.08
100	31.78	12.97	23.14	29.63	26.54	15.50	20.58	39.61
200	57.58	16.97	31.53	55.59	48.51	30.61	36.46	81.33



ตารางที่ ข.19 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด MBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 9

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด MBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่าง ๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
25	7.88	8.64	8.64	9.83	8.40	9.38	8.85	9.20
50	16.80	17.38	17.03	17.96	17.70	19.19	17.36	18.04
75	25.89	26.76	25.57	26.55	25.22	27.25	26.80	24.51
100	37.46	34.19	34.75	35.77	32.22	33.96	33.67	35.05
200	63.85	56.04	61.97	61.64	55.67	59.49	58.54	69.50

ตารางที่ ข.20 การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับกรด DBAA ของมีโซพอร์สซิลิเกตชนิดต่างๆ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่พีเอชเท่ากับ 9

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $\mu\text{g/l}$ )	ปริมาณของกรด DBAA ที่ถูกดูดซับด้วยสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ( $\mu\text{g/g}$ )							
	HMS	Ti-HMS	A-HMS	M-HMS	A3M7	A5M5	A7M3	PAC
0	-0.72	-0.09	-0.45	-0.22	-0.20	-0.15	-0.11	-0.11
25	6.62	0.73	1.85	5.83	4.85	1.02	5.14	5.83
50	11.06	1.98	7.53	7.68	10.09	2.29	12.71	15.29
75	15.78	3.90	13.38	14.36	13.31	2.80	15.65	22.64
100	18.80	6.44	18.92	17.15	14.98	3.64	21.59	32.41
200	28.70	13.12	35.06	26.93	26.70	6.12	41.30	71.86

ตารางที่ ข.21 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.43	-1.48	-0.51	-3.00	-0.62
25	11.72	8.86	7.29	6.03	9.41
50	23.88	20.47	14.80	14.49	19.05
75	35.44	30.62	20.75	24.92	27.38
100	48.07	43.08	29.32	34.19	34.86
200	94.74	87.47	60.49	73.06	66.92

ตารางที่ ข.22 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ Ti-HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย Ti-HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.44	-1.47	-0.42	-2.98	-0.13
25	9.02	6.19	2.44	4.83	6.82
50	17.73	14.72	7.30	11.23	13.72
75	27.68	21.98	12.20	20.05	20.05
100	37.51	30.49	15.88	26.69	28.17
200	78.92	62.20	33.87	54.68	53.93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.23 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ A-HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A-HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.45	-1.84	-1.89	-2.97	-0.64
25	11.58	5.48	5.09	5.68	11.72
50	23.98	12.52	12.81	14.73	24.40
75	36.15	18.78	18.41	22.94	36.90
100	48.05	24.35	23.29	30.62	49.19
200	95.99	42.34	39.56	61.02	98.79

ตารางที่ ข.24 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ M-HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย M-HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.41	-1.47	-0.42	-2.99	-0.08
25	11.76	10.66	0.32	6.85	9.76
50	23.47	21.12	1.03	14.39	15.91
75	36.00	32.72	2.37	22.56	24.07
100	48.85	43.51	3.34	31.18	30.13
200	98.23	85.47	8.37	74.10	67.57

ตารางที่ ข.25 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ A3M7

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A3M7 (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.48	-0.41	-2.97	-0.07
25	11.92	9.95	1.11	7.30	9.15
50	23.71	21.31	2.28	17.88	19.21
75	36.06	33.19	4.04	28.21	30.09
100	47.96	43.97	6.27	37.32	40.96
200	96.21	85.47	11.73	76.67	83.82

ตารางที่ ข.25 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ A5M5

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A5M5 (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.48	-0.41	-2.99	-0.07
25	11.29	9.89	5.10	7.04	11.99
50	22.52	20.91	9.67	17.68	24.26
75	34.14	32.21	16.25	28.52	35.93
100	46.10	42.93	22.35	39.15	47.75
200	94.54	84.46	41.76	77.65	96.11

ตารางที่ ข.26 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ A7M3

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A7M3 (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.45	-1.46	-0.41	-2.97	-0.07
25	11.90	10.28	9.35	8.31	12.22
50	23.71	19.94	17.86	17.15	24.14
75	35.34	28.16	24.27	25.87	35.77
100	47.84	38.37	30.10	33.43	48.24
200	97.18	81.30	63.45	72.24	96.86

ตารางที่ ข.28 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ใน น้ำกลั่น ของ PAC

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย PAC (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.93	-1.60	-0.96	-2.94	-0.25
25	4.44	8.12	6.78	7.52	6.51
50	9.47	18.47	13.40	17.06	13.22
75	14.99	27.63	21.50	25.81	19.70
100	19.73	40.27	28.78	35.73	25.64
200	32.08	83.28	62.94	75.11	47.58

ตารางที่ ข.29 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.48	-0.41	-3.00	-0.07
25	11.85	9.51	3.39	7.46	9.19
50	24.08	2.26	9.58	18.16	19.52
75	36.43	32.79	14.75	29.41	28.47
100	48.40	44.39	19.29	39.13	38.29
200	98.20	88.80	43.87	83.09	76.98

ตารางที่ ข.30 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ Ti-HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย Ti-HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.47	-1.46	-0.41	-2.97	-0.07
25	8.68	5.35	2.46	5.65	4.28
50	14.88	13.95	6.46	12.51	9.17
75	22.21	20.02	10.23	18.66	13.50
100	31.18	27.18	13.99	27.12	18.82
200	65.33	54.56	27.60	53.04	41.44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.31 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ A-HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A-HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.46	-0.41	-2.97	-0.07
25	11.51	9.23	4.65	5.60	11.85
50	23.60	19.66	11.95	15.21	23.60
75	35.32	31.21	16.15	22.50	34.78
100	46.95	40.95	21.65	29.95	47.26
200	93.25	82.46	42.95	59.25	94.22

ตารางที่ ข.32 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ M-HMS

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย M-HMS (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.48	-0.41	-2.99	-0.08
25	11.95	9.34	7.02	8.28	11.59
50	24.41	20.88	12.20	19.73	22.50
75	36.63	31.29	15.94	30.37	32.50
100	48.78	42.83	21.52	41.22	42.34
200	98.30	87.16	37.66	82.86	80.51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข.33 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ A3M7

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A3M7 (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.47	-0.41	-2.98	-0.07
25	9.76	9.31	6.67	7.797	10.44
50	20.52	20.62	13.71	18.14	21.42
75	31.83	31.69	22.89	28.15	31.35
100	42.80	41.62	29.97	37.80	41.19
200	88.49	83.22	59.31	78.41	79.96

ตารางที่ ข.34 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ A5M5

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A5M5 (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.46	-0.41	-2.97	-0.07
25	11.18	9.92	5.16	7.77	11.91
50	22.91	21.03	9.45	16.96	23.82
75	35.17	31.33	15.57	27.57	36.43
100	46.48	42.44	21.79	35.41	48.45
200	94.53	84.95	43.44	76.81	97.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.35 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ A7M3

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย A7M3 (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-0.40	-1.46	-0.41	-2.98	-0.07
25	10.79	7.54	5.40	1.71	11.69
50	22.20	17.09	10.15	8.59	22.57
75	33.10	3.35	17.17	15.45	34.05
100	44.58	38.09	21.93	22.04	45.23
200	91.38	79.99	43.41	49.25	93.23

ตารางที่ ข.36 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกในการดูดซับสารละลายผสมของกรด HAA<sub>5</sub> ในน้ำประปา ของ PAC

ความเข้มข้นเริ่มต้น (µg/l)	ปริมาณของกรด HAA <sub>5</sub> แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับด้วย PAC (µg/g)				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
0	-2.16	-1.45	-0.49	-3.43	-0.13
25	9.05	3.23	3.87	8.53	12.29
50	19.90	8.60	9.65	20.33	24.57
75	30.57	17.13	16.24	31.76	36.67
100	38.73	20.67	19.05	43.58	49.74
200	82.20	38.80	28.23	91.81	99.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมา กัลยาประสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนสตรีรัตนบุรี จังหวัด นนทบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากร สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี การศึกษา 2548 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับมหาบัณฑิต ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใน ปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย