

การดูฉบับกระดาษโลหะติดกโดยใช้อุณหภูมิที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก



นางสาวพิชชาภา บุญญคง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF HALOACETIC ACIDS BY SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES

Miss Pidchapa Boonyakong

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

511072

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับกรดฮาโลอะซิติกโดยใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

โดย

นางสาวพิชชาภา บุญญคง

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

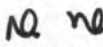
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

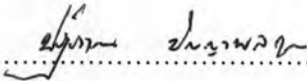
อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

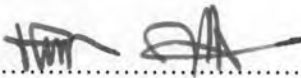
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

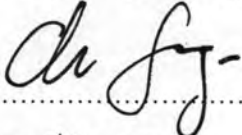
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

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

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ชัชลิดา ศรีอัมภาพร)

พิชชาภา บุญญคง : การดูดซับกรดฮาโลอะซิติกโดยใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก. (Adsorption of Haloacetic acids by superparamagnetic particles)  
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงปรากฏการณ์การดูดซับกรดฮาโลอะซิติกซึ่งเป็นสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยใช้อนุภาคขนาดนาโนชนิดแมกเนไทต์ที่ถูกเคลือบผิวด้วยซิลิกา ซึ่งมีคุณสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกทำให้สามารถแยกอนุภาคออกจากน้ำทำได้ง่ายโดยใช้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ถูกทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมูฟังก์ชันแบบเดี่ยวและแบบหมูฟังก์ชันคู่ที่สัดส่วน 1:1 โดยหมูฟังก์ชันที่ศึกษา ได้แก่ หมูอะมิโน และ หมูเมอร์แคปโต เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับกรดฮาโลอะซิติกบนตัวกลางดูดซับทุกชนิดเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 24 ชั่วโมง อัตราการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) นอกจากนั้นความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกในช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-300 ไมโครกรัมต่อลิตร) พบว่า ความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกโดยใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีลักษณะเฉพาะตัว เนื่องมาจากหมูฟังก์ชันบนพื้นผิวดังกล่าวดูดซับแต่ละชนิดส่งผลต่อแรงทางประจุไฟฟ้า พันธะไฮโดรเจน และความชอบน้ำของตัวกลางดูดซับจึงทำให้แรงที่สำคัญในการดูดซับกรดแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยกรดฮาโลอะซิติกที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างถูกดูดซับได้มากกว่ากรดฮาโลอะซิติกที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ และความเกะกะของโครงสร้างของกรดไตรคลอโรอะซิติกมีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของตัวกลางดูดซับแบบหมูฟังก์ชันคู่เช่นกัน ความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด แสดงให้เห็นว่าแรงที่ใช้ในการดูดซับไม่มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของสารละลายการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกในน้ำประปาจริง โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกได้สูงกว่า PAC ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับของ PAC เกิดการแย่งพื้นที่ในการดูดซับกัน

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... พิชชาภา บุญญคง.....  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... ปฏิภาณ.....  
 ปีการศึกษา 2551..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 4970470721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : HALOACETIC ACIDS / SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES /  
SURFACE FUNCTIONAL GROUPS / ADSORPTION

PIDCHAPA BOONYAKONG : ADSORPTION OF HALOACETIC ACIDS BY  
SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES. ADVISOR : PATIPARN  
PUNYAPALAKUL, DR., 133 pp.

In this study, adsorption efficiencies of haloacetic acids (HAA5), disinfection by-products (DBPs), were investigated by using modified superparamagnetic silica-coated magnetite nanoparticles. According to superparamagnetic characteristic, silica coated magnetite nanoparticles can be separated from wastewater by magnetic field easily. Superparamagnetic magnetite nanoparticles were synthesized and modified surface by silica coating (SCP) and organic functional groups grafting. 3-aminopropyltriethoxy- and 3-mercaptopropyl- functional groups were grafted on SCP surface by single and bi-functional grafting method. The results showed that adsorption of HAA5 on each adsorbent reached equilibrium state in 24 hours and consistent to pseudo second order model. The adsorption mechanisms of HAA5 onto synthesized particles at low concentration of HAA5 (0-300 µg/l) were specific due to electrostatic interaction, hydrogen bond and hydrophilic/hydrophobic interaction. This study found that the adsorption capacity of bromine HAA5 group were higher than adsorption capacities of chlorine HAA5 group. In addition, the steric effect of trichloroacetic acid molecular structure could increase adsorption capacity of bi-functional group adsorbent. However, the results showed that HAA5 adsorption capacities did not relate to pH significantly. Adsorption capacity of HAA5 on SCPs in real tap water had higher affinity than PAC due to competition of active surface accessibility.

Department : Environmental Engineering

Field of Study : Environmental Engineering

Academic Year : 2008

Student's Signature Pidchapa Boonyakong

Advisor's Signature P. Dr

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ความเข้าใจ คำแนะนำต่างๆ และคอยดูแลเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ และ ดร.ชัชลิตา ศรีอัมภพร ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิฉัน แก่ไข่ให้งานวิจัยนี้เป็นในแนวทางที่ดีที่สุด

ขอขอบพระคุณ เหล่าคณาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณาจารย์ของสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สจล. ทุก ๆ ท่าน ที่คอยอบรม สั่งสอน และให้ความรู้ในวิชาต่าง ๆ รวมไปถึงวิธีการดำเนินชีวิตในมหาวิทยาลัย ทำให้เป็นแนวทางในการปฏิบัติตนเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณครูและพี่ ๆ ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการและเครื่องมือของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ เครื่องมือ และคอยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนทั้งที่ภาควิชา และที่ลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ทั้งด้านวิชาการ และความเฮฮาที่ทำให้มีกำลังใจต่อสู้กับปัญหาที่เกิดขึ้น ขอขอบคุณคำที่อดทนและสู้มาด้วยกันกับเพื่อนคนนี่ตลอดมา ขอขอบคุณก๊ิกที่รับฟังและอยู่ข้าง ๆ เสมอ ขอขอบคุณพี่ผึ้งที่เป็นแนวทางที่ดีในการดำเนินชีวิตมาตั้งแต่ ม.ปลาย ขอขอบคุณสายโทรศัพท์ที่กำลังใจทุกสาย หน้าต่างเอ็มเอสเอ็นทุกหน้าต่าง ที่ทำให้ชีวิตในระหว่างการทำวิจัยมีสีสันไม่เจียบเหงา ขอขอบคุณพี่เอ๋ ที่แบ่งปันความคิดดีดีระหว่างทางเสมอ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติ ๆ ที่ให้โอกาสในการศึกษาจนมาถึงระดับปริญญาโทนี้ ทั้งกำลังใจทรัพย์ และที่สำคัญคือกำลังใจดี ๆ ที่ส่งให้ลูกคนนี้เสมอมา ขอขอบคุณน้องชายที่ให้คำแนะนำ กำลังใจ และคอยดูแลคุณพ่อกับคุณแม่ระหว่างที่เราไม่อยู่ ขอขอบคุณทุก ๆ คน



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids : HAAs).....	5
2.1.1 การเกิดกรดฮาโลอะซิติก.....	5
2.1.2 ชนิดของกรดฮาโลอะซิติก .....	5
2.1.3 ค่ามาตรฐานของกรดฮาโลอะซิติก.....	8
2.1.4 ความเป็นพิษของกรดฮาโลอะซิติก.....	8
2.2 วิธีการกำจัดกรดฮาโลอะซิติกในน้ำ.....	8
2.3 กระบวนการดูดซับ (adsorption process).....	9
2.3.1 ลักษณะการดูดซับ .....	11
2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	12
2.3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ.....	14
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	16
2.4 Superparamagnetic nanoparticles.....	17
2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	30
3.2 แผนการทดลอง.....	33
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34
3.3.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ.....	34
3.3.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของตัวกลางดูดซับ อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด .....	39
3.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาลออะซิติก (HAA5) .....	44
3.3.4 การศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ HAA5 ของตัวกลาง ดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	46
3.3.5 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ HAA5 ของตัวกลางดูดซับ อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	47
3.3.6 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ HAA5 ของ ตัวกลางดูดซับ อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด....	49
3.3.7 การศึกษาคุณสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) HAA5 ของ ตัวกลางดูดซับ อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	53
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มี สมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด .....	53
4.1.1 ขนาดอนุภาคของตัวกลางดูดซับ.....	53
4.1.2 พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ.....	54
4.1.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ.....	55
4.1.4 ประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ.....	57
4.1.5 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis).....	59
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาลออะซิติกของอนุภาคที่มีสมบัติ ซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	61
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ HAA5 ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด.....	68
4.3.1 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการ ดูดซับ HAA5.....	68



4.3.2 ผลของโครงสร้างของ HAA5 แต่ละชนิดต่อประสิทธิภาพการดูดซับ....	73
4.3.3 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ HAA5.....	79
4.4 คุณสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) HAA5 บนตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มี สมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	88
4.4.1 กรณีควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น.....	88
4.4.2 กรณีการดูดซับ HAA5 ในน้ำประปา.....	94
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก .....	104
ภาคผนวก ก ค่าประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด.....	105
ภาคผนวก ข การศึกษาจลนพลศาสตร์และความสามารถในการดูดซับกรด ฮาโลอะซิติกของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	133

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	โครงสร้างและสมบัติพื้นฐานของกรดฮาโลอะซิติก..... 6
ตารางที่ 2.1(ต่อ)	โครงสร้างและสมบัติพื้นฐานของกรดฮาโลอะซิติก..... 7
ตารางที่ 2.2	หมู่ฟังก์ชันที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดักจับ..... 23
ตารางที่ 3.1	รายการเครื่องมือวิเคราะห์และวัสดุอุปกรณ์..... 30
ตารางที่ 3.1(ต่อ)	รายการเครื่องมือวิเคราะห์และวัสดุอุปกรณ์..... 31
ตารางที่ 3.2	รายการสารเคมี..... 31
ตารางที่ 3.3	พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวกลางดูดซับ..... 39
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซิติก ของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก..... 47
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของ ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก..... 48
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของตัวกลาง ดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก..... 49
ตารางที่ 3.6(ต่อ)	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกของตัวกลาง ดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก..... 50
ตารางที่ 3.7	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) กรดฮาโลอะซิติกของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น..... 51
ตารางที่ 3.8	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติในการคัดเลือก (Selectivity) กรดฮาโลอะซิติกของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก แต่ละชนิดในน้ำประปา..... 52
ตารางที่ 4.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พารา- แมกเนติกแต่ละชนิด..... 60
ตารางที่ 4.2	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-first order และ pseudo- second order..... 66

## สารบัญภาพ

	หน้า	
ภาพที่ 2.1	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ.....	12
ภาพที่ 2.2	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	14
ภาพที่ 2.3	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	15
ภาพที่ 2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มข้นของ สนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	19
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ ละชนิด.....	31
ภาพที่ 3.2	แผนการทดลองการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกด้วยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมก เนติก.....	34
ภาพที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียม Superparamagnetic nanoparticles ชนิด magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ).....	35
ภาพที่ 3.4	วิธีการป้องกันการรวมตัว (aggregation) ของอนุภาค magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ).....	35
ภาพที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียม Superparamagnetic Silica Particles (SCP).....	36
ภาพที่ 3.6	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาค SCP (หมู่ซิลานอล).....	36
ภาพที่ 3.7	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาค A-SCP (หมู่อะมิโน).....	37
ภาพที่ 3.8	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาค M-SCP (หมู่เมอร์แคปโต).....	38
ภาพที่ 3.9	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาค AM-SCP (หมู่อะมิโนและหมู่เมอร์แคปโต).....	39
ภาพที่ 3.10	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซิติกตามวิธีการของ USEPA Method 552.2 .....	44
ภาพที่ 3.10 (ต่อ)	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซิติกตามวิธีการของ USEPA Method 552.2 .....	45
ภาพที่ 4.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนชนิดแมกเนไทต์ .....	53
ภาพที่ 4.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มี สมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด .....	54
ภาพที่ 4.3	ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนในสถานะแก๊ส ของตัวกลางดูดซับ SCP.....	55
ภาพที่ 4.4	ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนในสถานะแก๊ส ของตัวกลางดูดซับ A-SCP.....	55

	หน้า	
ภาพที่ 4.5	สเปกตรัม FT-IR ของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	56
ภาพที่ 4.6	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	56
ภาพที่ 4.7	ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิดและถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	57
ภาพที่ 4.8	พื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปที่พีเอชต่าง ๆ ของตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแต่ละชนิด.....	58
ภาพที่ 4.9	ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของ A-SCP, M-SCP และ AM-SCP.....	59
ภาพที่ 4.10	จลนพลศาสตร์การดูดซับ MCAA บนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	61
ภาพที่ 4.11	จลนพลศาสตร์การดูดซับ DCAA บนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	62
ภาพที่ 4.12	จลนพลศาสตร์การดูดซับ TCAA บนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	62
ภาพที่ 4.13	จลนพลศาสตร์การดูดซับ MBAA บนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	63
ภาพที่ 4.14	จลนพลศาสตร์การดูดซับ DBAA บนอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	64
ภาพที่ 4.15	ประสิทธิภาพการดูดซับ MCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	69
ภาพที่ 4.16	ประสิทธิภาพการดูดซับ DCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	70
ภาพที่ 4.17	ประสิทธิภาพการดูดซับ TCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	71
ภาพที่ 4.18	ประสิทธิภาพการดูดซับ MBAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	72
ภาพที่ 4.19	ประสิทธิภาพการดูดซับ DBAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	73
ภาพที่ 4.20	ความสามารถในการดูดซับ HAA5 ด้วย SCP.....	74

	หน้า
ภาพที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับ HAA5 ด้วย A-SCP.....	75
ภาพที่ 4.22 ความสามารถในการดูดซับ HAA5 ด้วย M-SCP.....	76
ภาพที่ 4.23 ความสามารถในการดูดซับ HAA5 ด้วย AM-SCP.....	77
ภาพที่ 4.24 ความสามารถในการดูดซับ HAA5 ด้วย PAC.....	78
ภาพที่ 4.25 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ MCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	79
ภาพที่ 4.25 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ MCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์ (ต่อ) พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	80
ภาพที่ 4.26 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ DCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	81
ภาพที่ 4.27 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ TCAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	83
ภาพที่ 4.28 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ MBAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	85
ภาพที่ 4.29 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ DBAA ของอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ.....	87
ภาพที่ 4.30 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ SCP กรณีควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น.....	89
ภาพที่ 4.31 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ A-SCP กรณีควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น .....	90
ภาพที่ 4.32 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ M-SCP กรณีควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น .....	91
ภาพที่ 4.33 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ AM-SCP กรณีควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น.....	92
ภาพที่ 4.34 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ PAC กรณีควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ในน้ำกลั่น.....	93
ภาพที่ 4.35 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ SCP กรณีการดูดซับในน้ำประปา.....	94



	หน้า
ภาพที่ 4.36 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ A-SCP กรณีการดูดซับใน น้ำประปา .....	95
ภาพที่ 4.37 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ M-SCP กรณีการดูดซับใน น้ำประปา.....	95
ภาพที่ 4.38 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ AM-SCP กรณีการดูดซับใน น้ำประปา.....	96
ภาพที่ 4.39 คุณสมบัติในการคัดเลือก HAA5 บนตัวกลางดูดซับ PAC กรณีการดูดซับใน น้ำประปา.....	96