

สมบัติในการดูดซับโลหะของซิลิกาที่มีสารต้นแบบเป็นสารลดแรงตึงผิวแคตไอออน

นายชนัญญ์ อยู่จ้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

METAL SORPTION PROPERTIES OF CATIONIC SURFACTANT TEMPLATED SILICA

Mr. Chanan Yujui

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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

501438

ชัญญ์ อยู่จ้อย : สมบัติในการดูดซับ โลหะของซิลิกาที่มีสารตั้งแบบเป็นสารลดแรงตึงผิวแคตไอออน. (METAL SORPTION PROPERTIES OF CATIONIC SURFACTANT TEMPLATED SILICA) อ.ที่ปรึกษา : ดร.อมรรวรรณ อินทศิริ, 58 หน้า.

ได้ทำการศึกษาสมบัติในการสกัดโลหะของซิลิกาที่เตรียมโดยใช้ CTAB เป็นสารตั้งแบบปัจจัยต่างๆ ได้รับการตรวจสอบทั้งในรูปแบบแบบทซ์และรูปแบบคอลัมน์ ผลการทดลองในรูปแบบแบบทซ์ได้แสดงให้เห็นว่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะอยู่ที่ค่าประมาณ 4 การมีอยู่ของเกลือโซเดียมและโพแทสเซียมในสารละลายโลหะช่วยเพิ่มการสกัด Ni^{2+} อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เกลือเหล่านี้ไม่มีผลต่อการสกัด Cd^{2+} ข้อมูลการดูดซับที่ได้จากฟังก์ชันของความเข้มข้นของโลหะสอดคล้องกับแบบจำลองของ Langmuir. ความสามารถในการดูดซับแบบ Langmuir พบว่ามีค่า 0.625, 0.488, 0.476, 0.308 and 0.327 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการสกัด Fe^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} และ Cd^{2+} ตามลำดับ ข้อมูลการดูดซับถูกนำไปสร้างเป็นแบบจำลองเทียบกับสมการของ intra-particle diffusion, pseudo-first-order และ pseudo-second-order kinetics ซึ่งพบว่า ได้ผลตาม pseudo-second-order kinetic การศึกษารอบของการดูดซับ-การคายโลหะได้แสดงว่าซิลิกาชนิดนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากถึง 5 ครั้ง โดยปราศจากการลดลงของความสามารถในการดูดซับ สำหรับวิธีแบบคอลัมน์ ได้ทำการตรวจสอบผลของอัตราการไหลและปริมาณสารตัวอย่าง อัตราการไหลที่เหมาะสมต่อการดูดซับ โลหะคือ 2 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณของสารตัวอย่างที่เหมาะสมคือ 300 มิลลิลิตร ความสามารถสูงสุดในการสกัดโลหะของซิลิกาคือ 0.222 และ 0.589 มิลลิโมลต่อกรัมสำหรับการสกัด Pb^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ การศึกษารอบของการดูดซับและการคายโลหะได้แสดงถึงความสามารถในการนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่โดยปราศจากการสูญเสียความสามารถในการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ซิลิกาชนิดนี้สามารถประยุกต์กับการสกัด Pb^{2+} ที่มีในน้ำประปา น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างประสบผลสำเร็จ

สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา..... 2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Amorn Anu*

4789072720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: SURFACTANT TEMPLATED SILICA / CTAB / METAL SORPTION

CHANAN YUJUI : METAL SORPTION PROPERTIES OF CATIONIC SURFACTANT TEMPLATED SILICA. THESIS ADVISOR : AMARAWAN INTASIRI, Ph.D., 58 pp.

The metal sorption properties of silica prepared with cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) as a template was studied. Various parameters were investigated in both batch and column methods. The results based on batch experiments exhibited the appropriate pH around 4 for the metal sorption condition. The presence of sodium and potassium salts in the metal solution increased significantly the extraction of Ni²⁺ whereas these salts did not have much effect on the extraction of Cd²⁺. The adsorption data obtained as a function of metal concentration were fitted to a Langmuir adsorption model. The Langmuir adsorption capacity was found to be 0.625, 0.488, 0.476, 0.308 and 0.327 mmol g⁻¹ for the extraction of Fe²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺ and Cd²⁺, respectively. The adsorption data were modeled using intra-particle diffusion, pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic equations. It was shown that the pseudo-second-order kinetic equation could best described the adsorption kinetics. The study of metal adsorption-desorption cycles demonstrated five times recyclability of silica without the decline in the sorption capacity. In column method, the effect of flow rate and sample volume were investigated. The flow rate suitable for metal sorption was found to be 2 mL min⁻¹ and the optimum sample volume was 300 mL. The maximum metal adsorption capacities of silica were 0.222 and 0.589 mmol g⁻¹ for the extraction of Pb²⁺ and Ni²⁺, respectively. The study of metal adsorption-desorption cycles showed the recyclability of the sorbent without considerable loss of adsorption capacity. The silica was also successfully applied for the extraction of Pb²⁺ contained in tap water, water from Chao Phraya river and waste water from plants

Field of study..... Environmental Science Student's signature..... CHANAN YUJUI
 Academic year..... 2007 Advisor's signature..... *Amarawan Intasiri*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อมรवारณ อินทศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดการวิจัย รวมถึงให้ความรู้ คำปรึกษาจนกระทั่งการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยตานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณศิริ ชิตางกูร และ อาจารย์ ดร.ปรีเปรม พัฒนมหกุล ที่ให้ความสนใจและให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ อีกทั้งยังยินดีสละเวลาอันมีค่าในการตรวจทาน แก้ไขและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการในการวิจัย

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการ SPE ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้านด้วยดีเสมอมา

เหนือสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อบิดา มารดาของผู้วิจัยที่ได้มอบความรักและกำลังใจที่ดีเสมอมาโดยไม่หวังผลตอบแทน ทำให้ผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นอุปสรรคได้ด้วยดีจนเสร็จสิ้นการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1 ซิลิกา.....	2
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับซิลิกา.....	2
2.1.2 การสังเคราะห์ซิลิกา.....	3
2.1.3 สารลดแรงตึงผิว.....	4
2.2 เทคนิคการสกัดด้วยเฟสของแข็ง (Solid-phase extraction, SPE).....	5
2.2.1 กลไกการทำงานของเทคนิคการสกัดด้วยเฟสของแข็ง.....	5
2.2.2 การสกัดโลหะด้วยเฟสของแข็งเชิงปริมาณวิเคราะห์.....	7
2.2.3 อัตราเร็วในการดูดซับ.....	8
2.3 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของซิลิกา.....	9
2.3.1 เทคนิคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD).....	9
2.3.2 เทคนิควิเคราะห์การดูดซับไนโตรเจน (Nitrogen sorption analysis).....	11
2.3.3 เทคนิคการเบี่ยงเบนลำแสงเลเซอร์ของมาลเวิร์น (Malvern laser diffraction).....	14
2.3.4 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.5 วัตถุประสงค์.....	17
บทที่ 3 การทดลอง.....	17
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	18
3.1.1 อุปกรณ์.....	18

	หน้า
3.1.2 สารเคมี.....	18
3.2 วิธีการทดลอง.....	19
3.2.1 การสังเคราะห์ซิลิกาที่มีสารต้นแบบเป็นสารลดแรงตึงผิวแคตไอออนชนิด CTAB	19
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมโซพอร์สซิลิกา.....	19
3.2.2.1 การหาปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในซิลิกา (organic matter contents)....	20
3.2.2.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ในซิลิกา.....	20
3.2.2.3 การศึกษาลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างของซิลิกา.....	20
3.2.2.4 การหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนของซิลิกา.....	19
3.2.2.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลิกา.....	20
3.2.2.6 การศึกษาขนาดอนุภาคของซิลิกา.....	20
3.2.3 การศึกษาสมบัติด้านการสกัด โลหะของซิลิกา.....	20
3.2.3.1 การสกัดโลหะในรูปแบบแบทช์.....	20
3.2.3.2 การสกัดโลหะในรูปแบบคอลัมน์.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	22
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซิลิกาที่เตรียมโดยอาศัยสารลดแรงตึงผิวแคตไอออนชนิด CTAB เป็นสารต้นแบบ.....	22
4.1.1 ลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างของซิลิกา.....	23
4.1.2 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนของซิลิกา.....	24
4.1.3 ปริมาณสารอินทรีย์ในซิลิกา.....	25
4.1.4 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่อยู่ในซิลิกา.....	26
4.1.5 สมบัติด้านการสกัดโลหะของซิลิกาที่มี CTAB เป็นสารต้นแบบในการสังเคราะห์...	27
4.1.5.1 การสกัดโลหะในรูปแบบแบทช์.....	27
4.1.5.1.1 ความสามารถในการสกัดโลหะของซิลิกา.....	27
4.1.5.1.2 ผลของเกลือต่อสมบัติในการสกัดโลหะของซิลิกา.....	31
4.1.5.1.3 ผลของ pH สารละลายโลหะต่อสมบัติในการสกัดโลหะของซิลิกา.....	32
4.1.5.1.4 อัตราเร็วในการสกัดโลหะของซิลิกา.....	33
4.1.5.1.5 Reproducibility ของซิลิกา.....	36
4.1.5.1.6 การคายโลหะของซิลิกา.....	36
4.1.5.1.7 การนำซิลิกากลับมาใช้ใหม่ (recyclability).....	38
4.1.5.2 การสกัดโลหะในรูปแบบคอลัมน์.....	39

4.1.5.2.1 ความสามารถในการสกัด Pb^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์ของซีลิกา.....	39
4.1.5.2.2 อัตราการไหลของสารละลาย Pb^{2+}	41
4.1.5.2.3 ปริมาตรสารละลาย Pb^{2+} ต่อความสามารถในการสกัด โลหะของซีลิกา.....	42
4.1.5.2.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เป็นตัวชะ (eluent) ต่อการคาย โลหะออกจากซีลิกา.....	43
4.1.5.2.5 Reproducibility ของซีลิกา.....	44
4.1.5.2.6 การนำซีลิกากลับมาใช้ใหม่ในการสกัดในรูปแบบคอลัมน์.....	45
4.1.5.2.7 ความสามารถในการสกัดโลหะชนิดอื่นๆ ในรูปแบบคอลัมน์.....	45
4.2 การประยุกต์ซีลิกากับการสกัดโลหะปนเปื้อนในสารตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อม.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	58

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ระยะระหว่างระนาบ (d) ของซลิคาที่ได้จากการสังเคราะห์และของซลิคาชนิดเดียวกันที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 540 °C.....	23
4.2	สมบัติทางกายภาพของซลิคาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 540 °C.....	25
4.3	ปริมาณสารอินทรีย์ในซลิคาที่หาได้จากการทดลองและที่คำนวณจากองค์ประกอบของสารตั้งต้น.....	26
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (b) empirical parameter (n) และปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ภาวะสมดุลที่ได้จาก Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm เมื่อทำการสกัดโลหะในตัวอย่างที่เป็นน้ำ.....	30
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (b) empirical parameter (n) และปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ภาวะสมดุลที่ได้จาก Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm เมื่อทำการสกัดโลหะในตัวอย่างที่เป็นสารละลาย 0.1 M NaNO_3	30
4.6	ความสามารถในการสกัดโลหะของซลิคาในงานวิจัยนี้เทียบกับซลิคาจากงานวิจัยอื่น	31
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าคงที่อัตราในรูปแบบต่างๆ และปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับโดยซลิคา ณ ภาวะสมดุล (q_e) เมื่อทำการสกัดโลหะในตัวอย่างที่เป็นน้ำ....	35
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าคงที่อัตราในรูปแบบต่างๆ และปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับโดยซลิคา ณ ภาวะสมดุล (q_e) เมื่อทำการสกัดโลหะในตัวอย่างที่เป็นสารละลาย 0.1 M NaNO_3	35
4.9	ปริมาณโลหะที่ถูกสกัดได้โดยซลิคาจากการทดลองและจาก pseudo-second-order kinetic ในตัวอย่างที่เป็นน้ำและที่เป็นสารละลาย 0.1 M NaNO_3	35
4.10	Reproducibility ของซลิคาแต่ละชุด.....	36
4.11	ปริมาณโลหะแต่ละชนิดที่ถูกคายออกมาเมื่อใช้ 1 M HNO_3 ในการคายโลหะออกจากซลิคาที่ผ่านการสกัดโลหะในตัวอย่างที่เป็นน้ำและสารละลาย 0.1 M NaNO_3	38
4.12	ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดและคายได้ในแต่ละรอบของการสกัดในรูปแบบแบทช์และร้อยละของการคาย Pb^{2+} ออกจากซลิคา.....	38

ตารางที่	หน้า	
4.13	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (b) empirical parameter (n) และปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกดูดซับบนซิลิกา ณ ภาวะสมดุลที่ได้จาก Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm เมื่อทำการสกัด Pb^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์จากตัวกลางที่เป็นน้ำและที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$	41
4.14	ผลของปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกคายออกมาต่อความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ใช้ในการคายโลหะออกจากซิลิกาที่ผ่านการสกัด Pb^{2+} ในตัวกลางที่เป็นน้ำและสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$	43
4.15	ปริมาณโลหะแต่ละชนิดที่ถูกคายออกมาเมื่อใช้ 1 M HNO_3 ในการคายโลหะออกจากซิลิกาที่ผ่านการสกัดโลหะในตัวกลางที่เป็นน้ำและสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$	44
4.16	ผลของ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดต่อซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นได้ในแต่ละชุด.....	44
4.17	ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดและคายได้ในแต่ละรอบของการสกัดในรูปแบบคอลัมน์และร้อยละของการคาย Pb^{2+} ออกจากซิลิกา.....	45
4.18	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2), ค่าคงที่แลงเมียร์ (b), empirical parameter (n) และปริมาณ Ni^{2+} ที่ถูกดูดซับบนซิลิกา ณ ภาวะสมดุลที่คำนวณได้จาก Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm เมื่อทำการสกัด Ni^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์จากตัวกลางที่เป็นน้ำและที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$	48
4.19	ค่า pH ของน้ำตัวอย่างและปริมาณ Pb^{2+} ที่ตรวจวัดได้.....	49
4.20	%recovery ของ Pb^{2+} หลังการ spike Pb^{2+} ลงในน้ำตัวอย่างจากน้ำประปาและน้ำตัวอย่างจากแม่น้ำเจ้าพระยา.....	49
4.21	ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของ Pb^{2+} ในน้ำตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เตรียมได้หลังการเจือจางกับความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่ตรวจวัดได้จาก AAS.....	50
4.22	ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดโดยซิลิกาเมื่อใช้สารละลาย Pb^{2+} ความเข้มข้นเริ่มต้นค่าต่างๆ ในน้ำตัวอย่างแหล่งต่างๆ โดยแสดงในหน่วย ร้อยละของการสกัด $mg\ g^{-1}$ และ $mmol\ g^{-1}$	50
ผ.1	องค์ประกอบโดยโมลของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกา.....	57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะ โครงสร้างของซิลิกา..... 2
2.2	ลักษณะรูปร่างของสารลดแรงตึงผิว..... 4
2.3	กลไกการทำงานแบบ Normal phase SPE..... 6
2.4	ไกการทำงานแบบ Reverse phase SPE..... 6
2.5	กลไกในการดูดซับแบบ Ion-exchange SPE..... 7
2.6	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบอะตอม..... 10
2.7	รูปร่างลักษณะแต่ละชนิดของรูพรุน..... 11
2.8	ไอโซเทอมของการดูดซับและการคายในโครเจนตาม IUPAC..... 12
2.9	hysteresis loops ทั้ง 4 แบบ..... 13
2.10	ลักษณะการทำงานของเครื่อง Malvern laser diffraction..... 14
2.11	ลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 15
3.1	รูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการหาปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่ในซิลิกา..... 18
3.2	ส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการสกัดโลหะในรูปแบบคอลัมน์..... 20
4.1	ลักษณะรูปร่างของซิลิกาที่มีสารตั้งแบบ CTAB อยู่ภายในโครงร่างเมื่อตรวจสอบโดยเทคนิค SEM..... 22
4.2	ขนาดอนุภาคซิลิกาและการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกาที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Malvern laser diffraction..... 22
4.3	รูปแบบการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของซิลิกาที่ได้จากการสังเคราะห์ (สีดำ) และของซิลิกาชนิดเดียวกันที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 540 °C (สีเทา)..... 23
4.4	ไอโซเทอมของการดูดซับและการคายในโครเจนของซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 540 °C..... 24
4.5	รูปแบบการกระจายขนาดรูพรุนของซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 540 °C..... 25
4.6	IR spectrum ของ (ก) ซิลิกาที่มีสารตั้งแบบ CTAB อยู่ภายในโครงร่าง (ข) โมเลกุล CTAB..... 26
4.7	ปริมาณโลหะแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยซิลิกาเมื่อใช้สารละลายโลหะความเข้มข้นเริ่มต้นค่าต่างๆ และทำการสกัดในตัวกลางที่เป็น (ก) น้ำ และ (ข) สารละลาย 0.1 M NaNO ₃ 27

รูปที่	หน้า
4.8 ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดโดยซลิคาเมื่อใช้สารละลายโลหะความเข้มข้นเริ่มต้นค่าต่างๆ และทำการสกัดในตัวกลางที่เป็นน้ำ และสารละลาย 0.1 M $NaNO_3$	28
4.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของสารละลายโลหะต่อปริมาณโลหะแต่ละชนิดที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ภาวะสมดุล เมื่อทำการสกัดโลหะในตัวกลางที่เป็นน้ำ และ (ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Langmuir isotherm.....	28
4.10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของสารละลายโลหะต่อปริมาณโลหะแต่ละชนิดที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ภาวะสมดุล เมื่อทำการสกัดโลหะในตัวกลางที่เป็น 0.1 M $NaNO_3$ และ (ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Langmuir isotherm	29
4.11 สัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Freundlich isotherm ของผลการสกัดโลหะจากตัวกลางที่เป็น (ก) น้ำ และ (ข) สารละลาย 0.1 M $NaNO_3$	29
4.12 ผลของเกลือชนิดต่างๆ ต่อสมบัติในการสกัด (ก) Cd^{2+} และ (ข) Ni^{2+} ของซลิคา.....	32
4.13 ปริมาณโลหะที่ถูกสกัดได้เมื่อทำการสกัดโลหะจากสารละลายที่มี pH เริ่มต้นค่าต่างๆ ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (วงกลมว่าง) และในตัวกลางที่เป็นสารละลาย 0.1 M $NaNO_3$ (วงกลมทึบ) (ก) Cd^{2+} และ (ข) Ni^{2+}	32
4.14 ปริมาณโลหะที่ถูกสกัดโดยซลิคา ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการสกัดในตัวกลางที่เป็น (ก) น้ำ และ (ข) สารละลาย 0.1 M $NaNO_3$	33
4.15 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ช่วงเวลาใดๆ กับรากที่สองของเวลา (เทียบกับรูปแบบ intra-particle diffusion) จากผลการสกัดโลหะในตัวกลางที่เป็น (ก) น้ำ และ (ข) สารละลาย 0.1 M $NaNO_3$	34
4.16 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\ln((q_c - q)/q_c)$ กับเวลา (เทียบกับรูปแบบ pseudo-first-order kinetic) จากผลการสกัดโลหะในตัวกลางที่เป็น (ก) น้ำ และ (ข) สารละลาย 0.1 M $NaNO_3$	34
4.17 รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง t/q กับเวลา (เทียบกับรูปแบบ pseudo-second-order kinetic) จากผลการสกัดโลหะในตัวกลางที่เป็น (ก) น้ำ และ (ข) สารละลาย 0.1 M $NaNO_3$	34
4.18 ร้อยละของการคาย Pb^{2+} ของซลิคาเมื่อใช้กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นต่างๆ เป็นสารคายโลหะ (eluent) ในเวลาที่ต่างกัน.....	37

รูปที่	หน้า
4.19 ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดได้เมื่อใช้สารละลาย Pb^{2+} เริ่มต้นค่าต่างๆ ในการสกัด จากตัวกลางที่เป็นน้ำ (วงกลมว่าง) และจากที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$ (วงกลมทึบ) โดยแสดงในหน่วย (ก) $mg\ g^{-1}$ (ข) ร้อยละของการสกัด.....	39
4.20 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของสารละลาย Pb^{2+} ต่อปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ภาวะสมดุล เมื่อทำการสกัด Pb^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์จากตัวกลางที่เป็นน้ำ (วงกลมว่าง) และจากตัวกลางที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$ (วงกลมทึบ) และ (ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Langmuir isotherm.....	40
4.21 ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Freundlich isotherm ของผลการสกัด Pb^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์จากตัวกลางที่เป็นน้ำเป็นน้ำ (วงกลมว่าง) และจากตัวกลางที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$ (วงกลมทึบ).....	41
4.22 ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดได้เมื่อใช้สารละลาย Pb^{2+} ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน.....	42
4.23 ปริมาณ Pb^{2+} ที่ถูกสกัดได้ในหน่วย (ก) $mg\ g^{-1}$ (ข) $mg\ g^{-1}\ min^{-1}$ เมื่อใช้สารละลายเริ่มต้นปริมาตรต่างๆ กัน.....	42
4.24 ปริมาณโลหะแต่ละชนิดที่ถูกสกัดได้โดยซลิคาในตัวกลางที่เป็นน้ำและที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$ โดยแสดงในหน่วย $mg\ g^{-1}$	46
4.25 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของสารละลาย Ni^{2+} ต่อปริมาณ Ni^{2+} ที่ถูกดูดซับบนซลิคา ณ ภาวะสมดุล เมื่อทำการสกัด Ni^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์จากตัวกลางที่เป็นน้ำ (วงกลมว่าง) และจากตัวกลางที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$ (วงกลมทึบ) และ (ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Langmuir isotherm.....	47
4.26 ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบ Freundlich isotherm ของการสกัด Ni^{2+} ในรูปแบบคอลัมน์จากตัวกลางที่เป็นน้ำ (วงกลมว่าง) และจากตัวกลางที่เป็นสารละลาย 5×10^{-3} M $NaNO_3$ (วงกลมทึบ).....	47

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AAS	atomic absorption spectrophotometer
BET	Brunauer-Emmett-Teller equation
BJH	Barret-Joyner-Halenda equation
CTAB	cetyltrimethylammonium bromide หรือ hexadecyltrimethylammonium bromide
deg.	degree
FTIR	fourier transform infrared spectrometer
LC	liquid chromatography
MeOH	methanol
SEM	scanning electron microscope
SPE	solid-phase extraction
TEOS	tetraethoxysilane
TMOS	tetramethoxysilane
XRD	X-ray diffractometer