

การดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซิลิกาเจล
เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน



นางสาวจूरรัตน์ ทองทวย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

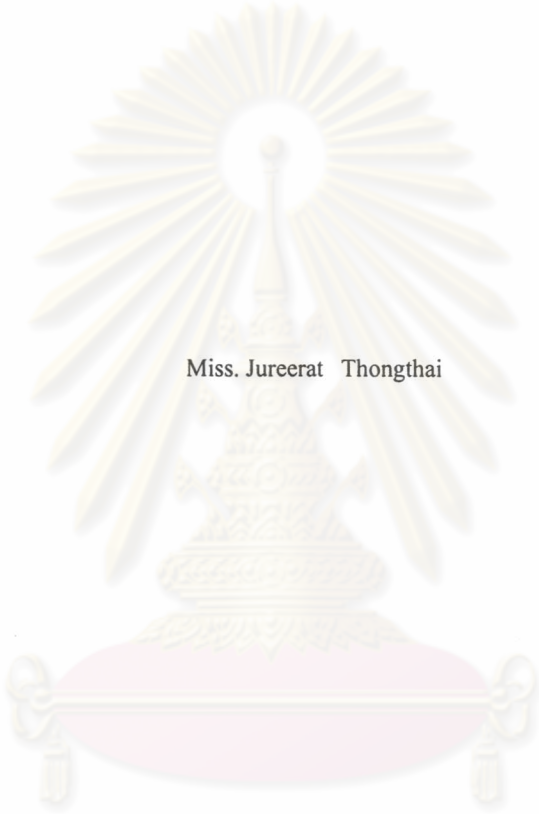
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2425-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF LEAD FROM SYNTHETIC WASTEWATER
USING SILICA GELS COATED WITH POLYETHYLENIMINE



Miss. Jureerat Thongthai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2425-6

จุริรัตน์ ทองทวย : การดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน. (ADSORPTION OF LEAD FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING SILICA GELS COATED WITH POLYETHYLENEIMINE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.สุธา ขาวเขียว, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์, 166 หน้า. ISBN 974-53-2425-6

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินซึ่งจะศึกษาที่ความเข้มข้นต่ำ โดยได้ทดลองเตรียมซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน (Si/PEI) และหาอัตราส่วนในการเคลือบที่เหมาะสม แล้วนำมาทดลองกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วโดยการทดลองแบบเบตซ์ ที่พีเอชช่วง 4-7 และศึกษาผลของความแรงไอออน (Ionic strength) ต่อความสามารถในการดูดซับ แล้วเลือกพีเอชที่เหมาะสมเพื่อนำไปศึกษาความสามารถในการดูดซับโดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ จากการทดลองเตรียมซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินพบว่าการเตรียมด้วยวิธีอิมเพรเกชันแบบแห้ง (Dry Impregnation) ในอัตราส่วนการเคลือบร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินในเมทานอล เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด และผลการทดลองความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยการทดลองแบบเบตซ์พบว่าที่พีเอช 4 และ 5 ไม่สามารถกำจัดตะกั่วได้ และความสามารถในการดูดซับตะกั่วจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับซิลิกาเจลที่พีเอช 6 โดยผลของการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินสามารถดูดซับตะกั่วได้ 6.72 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม คิดเป็นร้อยละ 59.18 และซิลิกาเจลสามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.02 มิลลิกรัมต่อตัวกลาง 1 กรัม คิดเป็นร้อยละ 26.71 และความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ส่วนที่พีเอช 7 ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับซิลิกาเจล และผลการทดลองจากการศึกษาผลของความแรงไอออน พบว่าความแรงไอออนไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ส่วนผลการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินมีค่ามากกว่าซิลิกาเจลอย่างชัดเจน และการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 5 มิลลิตรต่อนาที และ 10 มิลลิตรต่อนาที พบว่ามีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2548 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4670628321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : REMOVAL OF LEAD/ADSORPTION/SILICA GELS/POLYETHYLENEIMINE
 JUREERAT THONGTHAI : ADSORPTION OF LEAD FROM SYNTHETIC
 WASTEWATER USING SILICA GELS COATED WITH POLYETHYLENEIMINE.
 THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., THESIS COADVISOR :
 KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., 166 pp. ISBN 974-53-2425-6.

This research investigated the adsorption capacity of lead from low concentration synthetic wastewater using silica gels coated with polyethyleneimine. The research was divided into three steps. First, coated silica gels was prepared by various methods and condition. The suitable method and optimum condition were selected to prepare the adsorbent for adsorption studies. The second step, the coated silica gels was used for remove lead from synthetic wastewater in batch experiments. The effect of ionic strength on lead adsorption capacity was studied. pH was varied from 4 to 7. The last step was the study of lead adsorption capacity in continuous flow column. Dry Impregnation method at coating ratio 5% by weight per volume of polyethyleneimine in methanol provided the most optimum method coated silica gels. The batch experimental results showed that at pH 4 and pH 5 coated silica gels can't adsorb lead from synthetic wastewater but can effectively adsorbed lead at pH 6. The adsorption capacity of lead on coated silica gels and silica gels were 6.72 mg/g and 3.02 mg/g or 59.15% and 26.71%, respectively at initial lead concentration of 5 mg/l and equilibrium pH of 6. The adsorption capacity increase with increasing initial lead concentration. At pH 7 and concentration of lead less than 10 mg/l, adsorption capacity of coated silica gels was nearly equal to that of silica gels. The ionic strength had no effect to the adsorption capacity. Column experiment results showed that the coated silica gels had higher adsorption capacity than silica gels for lead adsorption. Adsorption capacity with service flow rate 5 ml/min was similar to that of 10 ml/min.

Department Environmental Engineering.....

Field of Study Environmental Engineering.....

Academic year 2005.....

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ น้อง และญาติๆทุกท่านที่สนับสนุน และให้กำลังใจ ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำอธิบายและช่วยแก้ปัญหาให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ประธานกรรมการและ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของ งานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุณา ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกใน การทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการของเสียดันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของ เสียดันตราย (CUFE, NRC-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการของเสียดันตราย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และ เครื่องมือที่ห้องวิจัยเป็นอย่างดีซึ่งตลอดมา

และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ผู้ทำวิจัย ขอขอบคุณ พี่ๆ ที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่างๆ และสุดท้ายขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

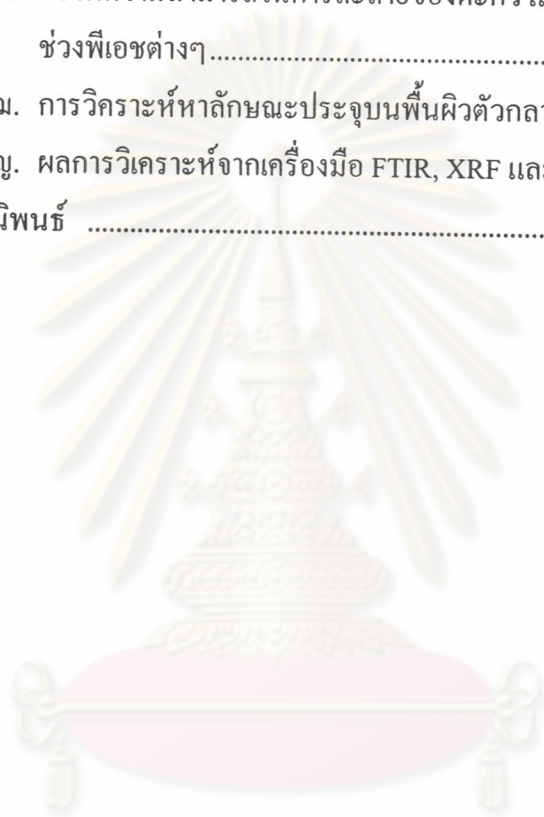
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ตะกั่ว.....	4
2.1.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว.....	4
2.1.2 ประโยชน์ของตะกั่ว.....	4
2.1.3 ผลกระทบต่อสุขภาพอันเนื่องจากสารตะกั่ว.....	5
2.1.4 ทางเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว.....	7
2.1.5 การศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำ.....	8
2.2 การกำจัดตะกั่วในน้ำ.....	10
2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี.....	10
2.2.2 การกรองผ่านเมมเบรน.....	12
2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	12
2.3 การดูดซับ.....	13
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	13
2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	14
2.3.3 ตัวอย่างในการดูดซับ.....	14
2.4 ซิลิกาเจล.....	17
2.4.1 เคมีพื้นผิวของซิลิกา.....	18
2.4.2 วิธีปรับปรุงพื้นผิวซิลิกา.....	18
2.5 สารที่นำมาปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาเพื่อกำจัดโลหะหนัก.....	19
2.6 โพลีเอทรีลีนไอมิน.....	21
2.6.1 คุณสมบัติและสูตรโครงสร้างทั่วไปของโพลีเอทรีลีนไอมิน.....	22
2.6.2 ตัวอย่างกลไกการเกิดคีเลชันของโพลีเอทรีลีนไอมินกับโลหะ.....	22

2.7 ทบทวนงานวิจัย.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี	26
3.1.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์.....	26
3.1.2 วัสดุคิบและสารเคมี.....	26
3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	27
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวกลาง	37
3.3.1-1 การเตรียมตัวคูดซับโดยเคลือบผิวซลิกาเจลด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน .	37
3.3.1-2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมินที่เตรียมได้จากแต่ละวิธี	45
3.3.1-3 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเคลือบซลิกาเจลด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน.....	47
3.3.2 การทดลองแบบแบดซ์	49
3.3.2-1 การหาเวลาที่เหมาะสมในการทดลองหาความสามารถในการคูดซับของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน.....	49
3.3.2-2 การศึกษาความสามารถในการคูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน	51
3.3.2-3 การศึกษาผลของความแรงไอออนในน้ำที่มีต่อความสามารถในการคูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน	53
3.3.3 การศึกษาความสามารถในการคูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมินโดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	55
3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติตัวกลาง.....	58
3.3.4-1 การหาปริมาณไนโตรเจนบนตัวกลาง.....	58
3.3.4-2 การวิเคราะห์หาตะกั่วบนตัวกลางที่คูดซับแล้ว	58
3.3.4-3 การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวตัวกลาง	58
3.4 วิธีการวิเคราะห์หรือตรวจวัดพารามิเตอร์.....	59
บทที่ 4 ผลการวิจัย	60
4.1 ผลการทดลองจากขั้นตอนการเตรียมตัวกลาง	60
4.1.1 ผลการทดลองเตรียมตัวกลางโดยใช้ซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน...	60
4.1.2 ผลการทดลองกำจัดตะกั่วของตัวกลางที่เตรียมได้จากแต่ละวิธี.....	61

4.1.3 ผลการทดลองกำจัดตะกั่วของซลิกาเจลที่เคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีนในอัตราส่วนแตกต่างกัน	63
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ซลิกาเจลที่เคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีนด้วย FTIR	65
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีนด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer	67
4.2 ผลการทดลองจากการทดลองแบบเบตซ์.....	68
4.2.1 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทดลองศึกษาความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีน.....	68
4.2.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีน โดยการทดลองแบบเบตซ์	71
4.2.3 การทดลองศึกษาผลของความแรงไอออนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีน.....	79
4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์.....	80
4.3.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีน โดยการทดลองแบบคอลัมน์	80
4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวกลาง	83
4.4.1 การหาปริมาณไนโตรเจนของซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีน	83
4.4.2 การวิเคราะห์หาตะกั่วบนซลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทรีลีน ไอมีนที่ผ่านการดูดซับตะกั่วมาแล้ว	86
4.4.3 การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวตัวกลาง.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	90
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์.....	93
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองในขั้นตอนการเตรียมตัวกลาง	101
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองการหาระยะเวลาที่ทำให้เกิดสภาวะสมดุลในการศึกษาความสามารถในการดูดซับของการทดลองแบบเบตซ์.....	105
ภาคผนวก ค. ผลการทดลองการศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวกลางโดยการทดลองแบบเบตซ์	122

ภาคผนวก ง.	ความสัมพันธ์ของไอโซเทอมที่พีเอชต่างๆ	133
ภาคผนวก จ.	ผลการทดลองการศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถ ในการดูดซับของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน	136
ภาคผนวก ฉ.	ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วด้วยคอลัมน์	141
ภาคผนวก ช.	ผลการทดลองการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนบนตัวกลาง	144
ภาคผนวก ซ.	กราฟความสามารถในการละลายของตะกั่ว และรูปของตะกั่วใน ช่วงพีเอชต่างๆ	147
ภาคผนวก ฅ.	การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวตัวกลาง	150
ภาคผนวก ฎ.	ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือ FTIR, XRF และ Surface Area Analyzer ...	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		166



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ตัวกลางดูดซับที่นำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก 15
2.2	ตัวอย่างงานวิจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ของซลิคาเจลด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ..... 20
3.1	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆในการเคลือบตัวกลางในแต่ละวิธี 29
3.2	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆในการทดสอบความสามารถในการดูดซับ ของตัวกลางที่เตรียมได้จากวิธีการเคลือบต่างๆ 31
3.3	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพซลิคาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทิลีนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... 32
3.4	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองหาระยะเวลาดูดซับ จนถึงจุดสมดุลของการทดลองแบบเบดซ์..... 33
3.5	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง หาความสามารถในการดูดซับของการทดลองแบบเบดซ์ 34
3.6	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความแรงไอออนในน้ำ ที่มีต่อการดูดซับของการทดลองแบบเบดซ์ 35
3.7	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ 36
4.1	ผลการทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้ซลิคาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมีน จากการเตรียมด้วยวิธีต่างๆ 61
4.2	ผลการทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้ซลิคาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมีนที่เคลือบด้วย อัตราส่วนแตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6..... 63
4.3	ผลการทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้ซลิคาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมีนที่เคลือบด้วย อัตราส่วนแตกต่างกันที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6..... 64
4.4	ผลการวิเคราะห์ตัวกลางด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer 67
4.5	สรุปผลการกำจัดตะกั่วของซลิคาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมีน และ ซลิคาเจล ที่พีเอช 4-7..... 75
4.6	รวบรวมข้อมูลค่าคงที่จากไอโซเทอมของงานวิจัยอื่น 77
4.7	ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของคอลัมน์..... 81
4.8	เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดตะกั่วของการทดลองแบบคอลัมน์กับ การทดลองแบบเบดซ์..... 82
4.9	ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนหลังจากการย่อยตัวกลางด้วยเครื่อง UV 84

ตารางที่	หน้า
4.10 ปริมาณ ไนโตรเจนที่มีในตัวอย่างแต่ละชนิด.....	85
ก-1 ผลการทดลองใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมินที่เตรียมได้จากวิธีต่างๆ ในการกำจัดตะกั่ว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด.....	102
ก-2 ผลการทดลองใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมินที่เตรียมได้จาก อัตราส่วนต่างๆกันในการกำจัดตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	103
ก-3 ผลการทดลองใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมินที่เตรียมได้จาก อัตราส่วนต่างๆกันในการกำจัดตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร	104
ข-1 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมิน ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 4	106
ข-2 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจล ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 4	108
ข-3 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมิน ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 5	110
ข-4 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจล ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 5	112
ข-5 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมิน ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 6	114
ข-6 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจล ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 6	116
ข-7 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมิน ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 7	118
ข-8 ผลการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ซิติกาเจล ในการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่พีเอช 7	120
ค-1 ผลการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่วของซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมิน ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	123
ค-2 ผลการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่วของซิติกาเจล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	124
ค-3 ผลการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่วของซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน ไอมิน ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	125
ค-4 ผลการทดลองหาความสามารถดูดซับตะกั่วของซิติกาเจล ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	126

ตารางที่	หน้า
ค-5 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	127
ค-6 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจล ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	128
ค-7 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	129
ค-8 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจล ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	130
ค-9 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	131
ค-10 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของซลิกาเจล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	132
ง-1 ความสัมพันธ์ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนคลิชที่พีเอชต่างๆ	134
ง-2 ค่าคงที่จากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนคลิชที่พีเอชต่างๆ	135
จ-1 ผลการทดลองศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถดูดซับตะกั่ว ของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน พีเอช 4	137
จ-2 ผลการทดลองศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถดูดซับตะกั่ว ของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน พีเอช 5	138
จ-3 ผลการทดลองศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถดูดซับตะกั่ว ของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน พีเอช 6	139
จ-4 ผลการทดลองศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถดูดซับตะกั่ว ของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน พีเอช 7	140
ฉ-1 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของคอลัมน์ อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6	142
ฉ-2 ผลการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่วของคอลัมน์ อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6	143
ช-1 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนจากเครื่อง UV	146
ฅ-1 ผลการวิเคราะห์ค่าประจุของซลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีลีนไอมิน ด้วยวิธีไตเตรทด้วยกรด-เบส	152
ฅ-2 ผลการวิเคราะห์ค่าประจุของซลิกาเจลด้วยวิธีไตเตรทด้วยกรด-เบส	153

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะชนิดต่างๆ	11
2.2 ขั้นตอนในการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน	14
2.3 ตัวอย่างการดูดซับจำพวกอนินทรีย์ที่นิยมนำมาปรับปรุงพื้นผิว	17
2.4 ตัวอย่างกระบวนการตรึงด้วยสารหมู่ไฮโดรเจน	18
2.5 ตัวอย่างการปรับปรุงด้วยกระบวนการเกิดโซล-เจล	19
2.6 ตัวอย่างของโพลีเอทิลีนในการจับตัวกับโลหะหนัก	22
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเคลือบผิวซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทิลีนไอมินตามวิธีที่ 1	39
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเคลือบผิวซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทิลีนไอมินตามวิธีที่ 2	40
3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการเคลือบผิวซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน ตามวิธีที่ 3	41
3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการเคลือบผิวซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทิลีนไอมินตามวิธีที่ 4	42
3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการเคลือบผิวซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทิลีนไอมินตามวิธีที่ 5	43
3.6 ชุดเครื่องมือการไล่ความชื้นออกจากตัวกลาง	44
3.7 ชุดเครื่องมือการหดยุทธสารละลาย โพลีเอทิลีนไอมิน ในสถานะสุญญากาศ	44
3.8 ชุดเครื่องมือการทำให้แห้งในสถานะสุญญากาศ	45
3.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยซิลิกาเจลที่เคลือบผิวด้วยโพลีเอทิลีนไอมินที่เตรียมได้จากแต่ละวิธี	46
3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเคลือบซิลิกาเจลด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน	48
3.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วด้วยซิลิกาเจลที่เคลือบผิวด้วยโพลีเอทิลีนไอมินแบบเบตช์ (Batch)	50
3.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยซิลิกาเจลที่เคลือบผิวด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน โดยการทดลองแบบเบตช์ (Batch)	52
3.13 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาผลของความแรงไอออนต่อความสามารถดูดซับตะกั่วด้วยซิลิกาเจลที่เคลือบผิวด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน	54
3.14 อุปกรณ์ในการทดลองแบบคอลัมน์	55
3.15 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยการทดลองแบบคอลัมน์	57

4.1	ชิลิกาเจล.....	60
4.2	ชิลิกาเจลเคลือบที่ด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน.....	60
4.3	ประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วของชิลิกาเจลที่เตรียมได้จากแต่ละวิธี	62
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วของชิลิกาเจลที่เคลือบด้วย โพลีเอทิลีนในอัตราส่วนต่างๆ	64
4.5	ผลการวิเคราะห์ชิลิกาเจลด้วยเครื่อง FTIR	65
4.6	ผลการวิเคราะห์ชิลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดย น้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินในเมทานอลด้วยเครื่อง FTIR.....	65
4.7	ผลการวิเคราะห์ชิลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดย..... น้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินในเมทานอลด้วยเครื่อง FTIR.....	66
4.8	ผลการวิเคราะห์ชิลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดย น้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินในเมทานอลด้วยเครื่อง FTIR.....	66
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับระยะเวลา โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 4	68
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับระยะเวลา โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 5	69
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับระยะเวลา โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 6	69
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับระยะเวลา โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7	70
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่ว ของชิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินกับพีเอช	71
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่วของชิลิกาเจล กับพีเอช.....	72
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่วของชิลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทิลีนไอมินกับความเข้มข้นสมมูล.....	72
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่วของชิลิกาเจล กับความเข้มข้นสมมูล	73
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่วของชิลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทิลีนไอมินและชิลิกาเจลกับความเข้มข้นสมมูล ที่พีเอช 4-7	73

รูปที่	หน้า
4.18 แล่งมัวร์ไอโซเทอมของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินที่พีเอช 6	76
4.19 เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับแบบจำลองจากไอโซเทอมระหว่าง ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน กับความเข้มข้นสมมูล ที่พีเอช 6	78
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบ ด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน กับความเข้มข้นเริ่มต้น ที่พีเอช 6	78
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบด้วย โพลีเอทิลีนไอมิน กับพีเอชที่ปริมาณไอออนในน้ำต่างๆ	79
4.22 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6 อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที	80
4.23 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6 อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที	81
4.24 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของซิลิกาเจลเคลือบโพลีเอทิลีนไอมินที่ยังไม่ใช้ทดลอง กับซิลิกาเจลเคลือบโพลีเอทิลีนไอมินที่ทดลองดูดซับตะกั่วแล้ว	86
4.25 ผลการวิเคราะห์ของซิลิกาเจลเคลือบโพลีเอทิลีนไอมินที่ยังไม่ใช้ดูดซับตะกั่ว	87
4.26 ผลการวิเคราะห์ของซิลิกาเจลเคลือบโพลีเอทิลีนไอมินใช้ดูดซับตะกั่วแล้ว	87
4.27 ลักษณะประจุบนพื้นผิวดักกลาง	88
ซ-1 แสดงผลความสามารถในการละลายของตะกั่วในน้ำที่พีเอชต่างๆ	148
ซ-2 แสดงรูปแบบของตะกั่วในน้ำที่พีเอชต่างๆ	149
ญ-1 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ของซิลิกาเจล	157
ญ-2 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน อัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	157
ญ-3 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	158
ญ-4 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	158
ญ-5 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินที่ยังไม่ใช้ ทดลอง กับซิลิกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินที่ใช้ทดลองดูดซับตะกั่วแล้ว	160

รูปที่	หน้า
ญ-6 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีนไอมินที่ยังไม่ใช้ ทดลอง.....	161
ญ-7 แสดงผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซิติกาเจลเคลือบด้วยโพลีเอทรีนไอมินที่ใช้ทดลอง ดูดซับตะกั่วแล้ว	162



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย