

การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซีลีกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์



นางสาวเบญจวรรณ วงศ์ศิริ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6520-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**REMOVAL OF LEAD AND COPPER FROM WASTEWATER BY IRON – OXIDE
COATED WASTE SILICA GEL**



Miss Benjawan Wongsiri

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter – Department)**

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6520-7

เบญจวรรณ วงศ์ศิริ : การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (REMOVAL OF LEAD AND COPPER FROM WASTEWATER BY IRON – OXIDE COATED WASTE SILICA GEL) อาจารย์ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร. เพ็ญฟ้า อุ๋นอบ ; 97 หน้า. ISBN 974-17-6520-7

จากการเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ผลการศึกษา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method) คือใช้สารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่พีเอชของสารละลายเหล็กเท่ากับ 12.0 ต่อซิลิกาเจล 5 กรัม ที่ผ่านการอบมาก่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนการเคลือบแบบที่ 2 (Modified Precipitation Method) คือ ใช้สารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 0.28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ต่อซิลิกาเจล 5 กรัม ที่ผ่านการอบมาก่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปรับพีเอชของสารละลายเหล็กให้เท่ากับ 7.0 โดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และอบต่อที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากเคลือบแล้วซิลิกาเจลที่ได้มีความสามารถในการจับกับโลหะหนักสูงขึ้น

ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและทองแดง คือ ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสนาน 30 นาที และพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 5.5 โดยสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้มากที่สุดเท่ากับ 11.82 และ 3.55 มิลลิกรัมต่อตัวดูดซับหนึ่งกรัม ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 3 หรือต่ำกว่า เหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของตัวดูดซับจะถูกชะละลายให้ปนเปื้อนออกมาในสารละลายได้ และการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 โมลต่อลิตรขึ้นไปในสารละลายโลหะจะส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้น้อยลง โดยการกำจัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช และเมื่อทำการเคลือบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วที่นำมาจากต่างห้องปฏิบัติการ พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้อยู่ในช่วง 8.21 – 11.82 มิลลิกรัมต่อซิลิกาเจลหนึ่งกรัม และกำจัดทองแดงได้อยู่ในช่วง 2.12 – 3.55 มิลลิกรัมต่อซิลิกาเจลหนึ่งกรัม โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจริงที่มีตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 22.66 มิลลิกรัมต่อลิตร และทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 13.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้เท่ากับ 89.48 และ 83.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4589102720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : IRON – OXIDE COATED WASTE SILICA GEL / ADSORPTION / LEAD / COPPER

BENJAWAN WONGSIRI : REMOVAL OF LEAD AND COPPER FROM

WASTEWATER BY IRON – OXIDE COATED WASTE SILICA GEL. THESIS

ADVISOR : FUANGFA UNOB, Ph.D., 97 pp. ISBN 974-17-6520-7

An iron – oxide coated waste silica gel was prepared for using as an adsorbent. Two preparation methods, modified adsorption method and modified precipitation method, were used. For the modified adsorption method, 5 grams of silica gel pretreated at 100 °C for 24 hours were mixed with 10 mL of 0.35 %w/v iron concentration at pH 12.0. For the modified precipitation method, 5 grams of silica gel pretreated at 500 °C for 3 hours were mixed with 25 mL of 0.25 %w/v iron concentration before adjusting the pH to 7.0. The obtained silica gel was baked at 80 °C for 10 hours and further calcined at 550 °C for 6 hours. The coated silica gels showed higher metals adsorption capacity than the uncoated one.

In the study of metal removal using the adsorbent, the effect of contact time and pH of solution were investigated. The contact time of 30 minutes was used in adsorption experiments. Pb and Cu could be adsorbed on the adsorbent at pH 5.5. The maximum adsorption capacity of Pb and Cu are 11.82 and 3.55 mg/g silica gel, respectively. When the pH of metal solution is 3 or lower, the solubilization of iron oxide coated on surface of silica gel is observed. The presence of NaCl in metal solution in the level of 0.01 M or higher reduces the adsorption capacity of Pb and Cu. The adsorption isotherm of Pb and Cu are defined by the function of Freundlich. The adsorbents prepared from waste silica gel of different sources have adsorption capacity in the range of 8.21 – 11.82 and 2.12 – 3.55 mg/g silica gel for Pb and Cu, respectively. The maximum %removal of Pb and Cu from real wastewater having initial concentration of 22.66 mg/L for Pb and 13.11 mg/L for Cu are 89.48 % and 83.52%, respectively.

Inter-departmentEnvironmental Science..... Student’s signature

Field of studyEnvironmental Science..... Advisor’s signature

Academic year2004..... Co-advisor’s signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร. เฟื่องฟ้า อุ่นอบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขรายละเอียดต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม และรองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และสมาชิกในกลุ่ม Environmental Analysis Research Group ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและเป็นกำลังใจเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนในการทำวิจัย รวมทั้งศูนย์เครื่องมือ และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์และให้คำแนะนำในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในด้านการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดีโดยตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.2 ตะกั่ว.....	4
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี.....	4
2.2.2 การนำไปใช้ประโยชน์.....	5
2.2.3 ความเป็นพิษของตะกั่ว.....	6
2.2.4 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย.....	6
2.3 ทองแดง.....	8
2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี.....	8
2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์.....	9
2.3.3 ความเป็นพิษของทองแดง.....	10
2.3.4 การกำจัดทองแดงในน้ำเสีย.....	11
2.4 ซิลิกาเจล.....	12
2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี.....	12
2.4.2 ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาเจล.....	12
2.4.3 ประโยชน์ของซิลิกาเจล.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 เหล็ก.....	14
2.5.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม.....	14
2.5.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก.....	15
2.5.3 เหล็กออกไซด์.....	17
2.5.4 การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของสารละลายออกไซด์.....	18
2.6 การดูดซับ.....	20
2.6.1 กลไกการดูดซับ.....	20
2.6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	20
2.6.1.2 การดูดซับทางเคมี.....	21
2.6.2 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี.....	22
2.6.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	23
2.6.4 สมดุลการดูดซับ.....	24
2.6.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	24
2.6.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช.....	25
2.6.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที.....	26
2.6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	28
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	34
3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	34
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	34
3.2.2 สารเคมี.....	35
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	35
3.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจล	
เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์	35
3.3.1.1 การเคลือบแบบที่ 1.....	36
3.3.1.2 การเคลือบแบบที่ 2.....	39
3.3.2 ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก.....	43
3.3.4 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะ.....	44
3.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก.....	45
3.3.6 ทดสอบกับน้ำเสียจริง.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	48
4.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	48
4.1.1 การเคลือบแบบที่ 1.....	48
4.1.2 การเคลือบแบบที่ 2.....	53
4.2 ผลการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	59
4.3 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	66
4.3.1 ระยะเวลาในการสัมผัส.....	66
4.3.2 ความเข้มข้นของสารละลายโลหะ.....	67
4.3.3 พีเอชของสารละลาย.....	68
4.3.4 ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กขณะใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	69
4.3.5 ผลของแกทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย.....	70
4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะ.....	72
4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซลิกาเจลที่มาจากต่างห้องปฏิบัติการ.....	77
4.6 ผลการทดสอบกับน้ำเสียจริง.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารประกอบตะกั่วที่ใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม.....	5
2.2 สารประกอบทองแดงที่ใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม.....	9
2.3 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบของเหล็ก.....	17
3.1 ตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษาในการเคลือบแบบที่ 1.....	37
3.2 ตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษาในการเคลือบแบบที่ 2.....	40
3.3 การวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติของซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	42
4.1 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ระยะเวลาในการคนที่ 5, 60 และ 120 นาที (pH 11.5 – 11.75).....	49
4.2 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เคลือบและ ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ที่อบที่อุณหภูมิ 100 ⁰ C เป็นเวลา 24 ชม. และ 500 ⁰ C เป็นเวลา 3 ชม.	53
4.3 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบต่างๆ	55
4.4 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน และปริมาณเหล็ก ของซีลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบ และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	59
4.5 ปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวของซีลิกาเจลก่อนและหลังเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1.....	60
4.6 ปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวของซีลิกาเจลก่อนและหลังเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2.....	61
4.7 การดูดซับตะกั่วด้วยซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่น้ำหนักต่างๆ	73
4.8 การดูดซับทองแดงด้วยซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่น้ำหนักต่างๆ	73
4.9 ค่าคงที่ในการดูดซับตะกั่วและทองแดงจากสมการของฟรุนด์ลิช.....	76
4.10 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงของซีลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ และไม่ได้เคลือบทั้ง 6 ชุด.....	77
4.11 ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียจริง ด้วยซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตกตะกอนโลหะหนักที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์.....	7
2.2 ลักษณะโครงสร้างของซลิคาเจล.....	13
2.3 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก.....	16
2.4 การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์.....	19
2.5 การดูดซับแคโทดไอออนและแอนไอออนบริเวณผิวของไฮดรตเหล็ก(III) ออกไซด์.....	19
2.6 การเกิดปฏิกิริยาแบบ inner – sphere และ outer – sphere complexation.....	22
2.7 ขั้นตอนการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน.....	23
2.8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	25
2.9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช.....	26
2.10 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบ BET.....	27
2.11 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ เมื่อ C_{soln} คือความเข้มข้นของ ตัวถูกละลายในสารละลาย และ C_{ads} คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ.....	27
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่1(Adsorption).....	36
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่2 (Precipitation).....	39
3.3 แผนผังขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถของซลิคาเจล เคลือบเหล็กออกไซด์ในการดูดซับโลหะหนัก.....	46
4.1 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอช ของสารละลายเหล็กเท่ากับ 4.18 ถึง 12.24	49
4.2 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลที่ไม่ได้อบกับที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม. และอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบ ด้วยเหล็กออกไซด์เปรียบเทียบกับซลิคาเจลที่ไม่ได้เคลือบเหล็กออกไซด์.....	51
4.3 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความ เข้มข้นของเหล็ก 0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16, 6.93 %w/v และพีเอชของสารละลาย เท่ากับ 12.0 ± 0.3	52
4.4 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจล 2 ชุด ที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแต่ไม่ ใส่เฟอร์ริกไนเตรดและที่ใส่เฟอร์ริกไนเตรดที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 0.06, 0.14, 0.28, 0.55, 1.11 %w/v	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.5	นำหนักเหล็กที่พบในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	56
4.6	ผลของเวลาในการเก็บต่อความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบและซิลิกาเจลที่เคลือบแล้ว.....	58
4.7	พื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1 (กำลังขยาย 1,500 เท่า).....	62
4.8	พื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 (กำลังขยาย 12,000 เท่า).....	62
4.9	ผลของ mapping แสดงการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบ (A) และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แบบที่ 1 (B) และแบบที่ 2 (C) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	63
4.10	ผลของ SEM/EDX แสดงองค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1(A) และแบบที่ 2 (B).....	64
4.11	ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ.....	66
4.12	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	67
4.13	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่พีเอชต่างๆ.....	69
4.14	ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงในสารละลายโลหะที่มีเกลือ NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ	70
4.15	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วและทองแดงด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่น้ำหนักต่างๆ.....	72
4.16	สมดุลการดูดซับสารละลายตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	74
4.17	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับตะกั่วตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช.....	74
4.18	สมดุลการดูดซับสารละลายทองแดงของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์.....	75
4.19	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับทองแดงตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช.....	75
4.20	ความสามารถในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลใช้แล้ว 6 ชุดที่อบแห้งไม่เคลือบและที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	78
4.21	ความสามารถในการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลใช้แล้ว 6 ชุดที่อบแห้งไม่เคลือบและที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรมและการศึกษาในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดของเสียเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมาในหลายๆ ด้าน ปัญหาที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง คือ ปัญหาการสะสมของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมที่นับวันยิ่งทวีความรุนแรงและควรได้รับการจัดการแก้ไขอย่างจริงจัง เนื่องจากโลหะหนักที่แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนอยู่ในดิน น้ำ และอากาศ สามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปทางห่วงโซ่อาหาร และเข้าสู่มนุษย์ซึ่งเป็นผู้บริโภคอันดับสุดท้ายในที่สุด โลหะหนักเหล่านี้เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะโดยวิธีการใด หากมีในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นตายหรือพิการได้ โดยโลหะหนักที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ตะกั่วและทองแดง ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิเช่น การผลิตแบตเตอรี่ ซี และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตและมีการปนเปื้อนของโลหะหนักเหล่านี้ จำเป็นต้องได้รับการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งหากมีการปนเปื้อนออกไปโลหะหนักจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ แต่เนื่องจากในธรรมชาติจะมีแร่ธาตุอยู่หลายชนิดที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ การกระจายและการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยกระบวนการดูดซับบนผิวของแร่ธาตุ ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้จะมีส่วนประกอบของออกไซด์ของเหล็ก อลูมิเนียมและแมงกานีส โดยจากการศึกษาพบว่าสารประกอบของเหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการจับกับโลหะหนักได้ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและประจุบนพื้นผิว (surface charge) อยู่มาก จึงสามารถดูดจับกับโลหะหนักรวมทั้งสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดี แต่ส่วนใหญ่เหล็กออกไซด์จะสามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้โดยตรงก็ต่อเมื่อมันแขวนลอยอยู่ในรูปของฟล็อกหรือเจลของไฮดรอกไซด์ ซึ่งการแยกของแข็งออกจากน้ำเมื่อใช้งานเสร็จทำได้ยาก รวมทั้งเหล็กออกไซด์อย่างเดียวเป็นสื่อให้น้ำผ่านได้ยาก (low hydraulic conductivity) ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาบรรจุเป็นตัวกลางในการกำจัดโลหะหนักสำหรับใช้งานจริง จึงได้มีการพัฒนาวิธีการเคลือบเหล็กออกไซด์ลงบนผิวของตัวกลางที่เป็นของแข็ง โดยของแข็งที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางนั้นควรมีการแผ่กระจายที่ดี มีขนาดเล็ก และมีพื้นที่ผิวมาก เพื่อให้เหล็กออกไซด์เคลือบได้มากขึ้นและเป็นการประหยัดพื้นที่ที่จะใช้ในการกำจัด

ซิลิกาเจล เป็นของแข็งที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากมีขนาดเล็กและมีรูพรุน รวมทั้งมีการแผ่กระจายที่ดี ทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวกลางในการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยซิลิกาเจลที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วจากการทำโครมาโทกราฟี (chromatography) ซึ่งเป็นซิลิกาเจลที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีราคาแพง แต่เมื่อผ่านการใช้งานได้เพียงครั้งเดียวแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ทำให้ตามห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่จึงมีของเสียซิลิกาเจลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า ก่อนที่จะถูกนำไปกำจัดหรือทิ้งเป็นขยะหากไม่มีสารพิษตกค้างต่อไป โดยการนำมาใช้เป็นตัวกลางในการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ เพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสีย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการนำของเสียกลับมาใช้กำจัดของเสียและเป็นการใช้ประโยชน์จากซิลิกาเจลที่ใช้แล้วได้อีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำซิลิกาเจลที่ใช้แล้วมาพัฒนาใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วด้วยเหล็กออกไซด์และภาวะที่เหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเมื่อใช้กับน้ำเสียจริง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาการนำเหล็กออกไซด์มาเคลือบบนผิวของซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว โดยศึกษาภาวะในการเคลือบที่เหมาะสมและศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียซิลิกาเจลที่เคลือบแล้วไปใช้กำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสีย โดยทำการทดลองแบบแบตช์

1.4 วิธีดำเนินการศึกษา

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์
2. ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

3. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยซัลฟิดาเจสเคลือบเหล็กออกไซด์
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซัลฟิดาเจสที่มาจากต่างห้องปฏิบัติการเมื่อเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ด้วยภาวะที่เหมาะสม
5. นำไปกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาและใช้ประโยชน์จากซัลฟิดาเจสที่ใช้แล้วอย่างคุ้มค่า
2. ทราบภาวะในการเคลือบซัลฟิดาเจสที่ใช้แล้วด้วยเหล็กออกไซด์และการนำไปใช้กำจัดตะกั่วและทองแดงในน้ำเสียจากภาวะที่เหมาะสม
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางในการนำซัลฟิดาเจสที่ใช้แล้วที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ไปใช้กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจริง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว และนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ รวมทั้งสามารถสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complexing compound) ได้หลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (food chain) ได้

2.2 ตะกั่ว

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ตะกั่วเป็นธาตุทรานสิชันตัวที่ 5 ของหมู่ IV A ในตารางธาตุ พบกระจายทั่วไปตามธรรมชาติมีหลายไอโซโทป เช่น Pb^{204} 1.48%, Pb^{207} 22.6%, Pb^{206} 23.60% และ Pb^{208} 52.30% แต่ที่ปรากฏเป็นไอโซโทปที่เสถียรมีเพียงชนิดเดียว คือ Pb^{208} มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +4 ซึ่งในสภาวะปกติตะกั่วจะมีสถานะเป็นของแข็ง สีน้ำเงินปนเทา มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีเลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.21 ความหนาแน่น 11.37 g/cm^3 มีความอ่อนตัวค่อนข้างสูง สามารถดัดรีดหรือตีได้ง่ายมีจุดเดือด $1620 \text{ }^\circ\text{C}$ และจุดหลอมเหลว $327.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ตะกั่วเป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน มีความหล่อลื่นในตัวเอง ทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถผสมกับโลหะต่างๆ เป็นโลหะผสม (alloys) ได้หลายชนิด สารประกอบของตะกั่วส่วนมากไม่ละลายน้ำ โดยทั่วไปมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ไดออกไซด์มีสีเทาหรือดำ ตะกั่วอาจอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์บางชนิดซึ่งสามารถละลายน้ำได้ (ชาญวิทย์ สุภรานนท์ รัศมี, 2543) ตะกั่วไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ในกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้นที่ร้อน

2.2.2 การนำไปใช้ประโยชน์

มีการนำเอาสารประกอบตะกั่วไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมหลายประเภท ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบตะกั่วที่ใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม

ประเภทของสารประกอบตะกั่ว	ประเภทของอุตสาหกรรม
<p>1. โลหะตะกั่ว ซึ่งผลิตจากสินแร่ตะกั่วได้แก่</p> <ul style="list-style-type: none"> - กาลีน่า (galena, PbS) - แองเจิลไซต์ (anglesite, PbSO₄) - เซอร์รัสไซต์ (cerrussite, PbCO₃) 	<p>ทำ grid หัวขั้วสะพานไฟของหม้อแบตเตอรี่ หัวกระสุนปืน หล่อตัวพิมพ์ หุ้มสายเคเบิล สายไฟฟ้า และสายโทรศัพท์ อุปกรณ์ป้องกันรังสีจากเครื่องเอกซเรย์</p>
<p>2. สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว (inorganic lead compound)</p> <ul style="list-style-type: none"> - เลดออกไซด์ (PbO) - เลดไนเตรต (Pb(NO₃)₂) - เลดอะซิเตต (Pb(CH₃COO)₂) - เลดคาร์บอเนต (PbCO₃), เลดซัลเฟต (PbSO₄) และเลดโครเมต (PbCrO₄) 	<p>การผลิตสี แบตเตอรี่ และการผลิตยาง การผลิตยางและพลาสติก การผลิตเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม การผลิตสี</p>
<p>3. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (organic lead compound)</p> <ul style="list-style-type: none"> - เลดสเตียเรต (Pb(C₁₈H₃₅O₂)₂) - เลดเตตราเอทิลเลด (Pb(C₂H₅)₄) - เลดเตตราเมทิลเลด (Pb(CH₃)₄) 	<p>การผลิตแลคเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น และสี ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าออกเทนให้สูงขึ้น ช่วยป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ (ปัจจุบันไม่ใช่แล้ว)</p>

2.2.3 ความเป็นพิษของตะกั่ว

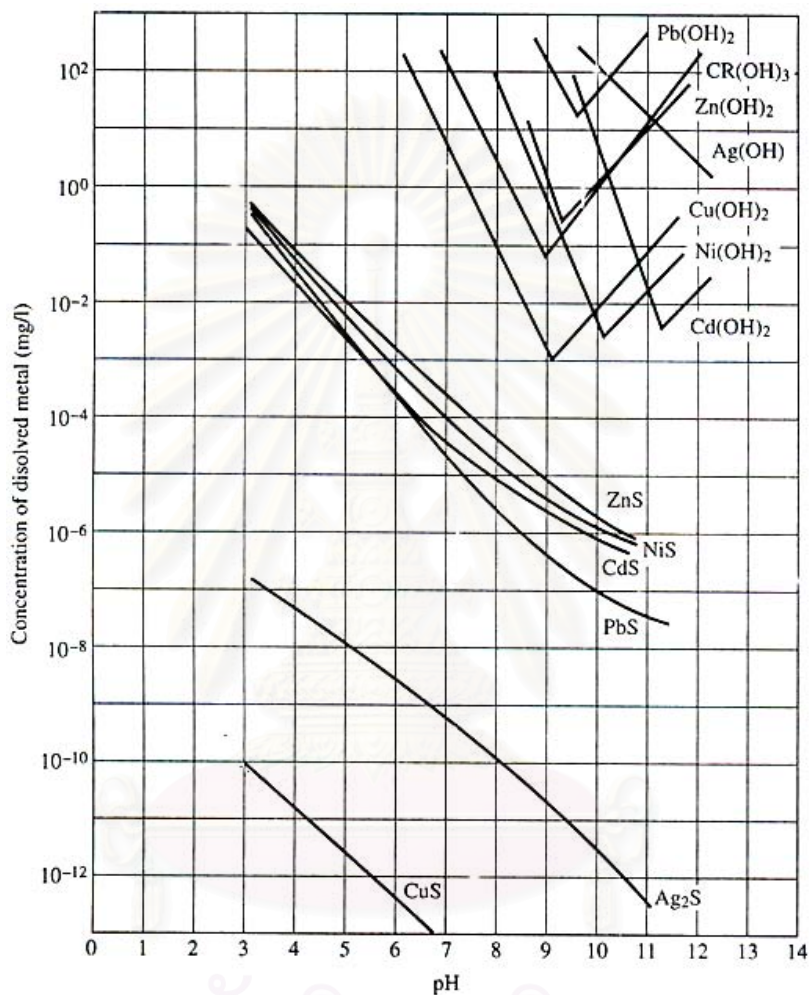
ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ทั้งจากการหายใจ การกิน และทางผิวหนัง ขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปแบบของตะกั่วที่ได้รับ ยกตัวอย่างเช่น ตะกั่วอินทรีย์ ได้แก่ $Pb(C_{18}H_{35}O_2)_2$, $Pb(C_2H_5)_4$ และ $Pb(CH_3)_4$ ที่สามารถซึมผ่านผิวหนังได้ เมื่อตะกั่วซึมเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนต่างๆ ของร่างกาย ทำให้สามารถพบตะกั่วได้ในทุกๆ ส่วนของร่างกาย ทั้งเนื้อเยื่ออ่อน ได้แก่ ไขกระดูก ระบบประสาท ไต และตับ เป็นต้น รวมทั้งเนื้อเยื่อแข็ง ได้แก่ กระดูก เส้นผม เล็บ และฟัน เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในกระดูกสูงถึง 90 % อย่างไรก็ตามตะกั่วจะถูกขับออกจากร่างกายโดยทางเหงื่อ ปัสสาวะ หรือน้ำนม หากถ้าได้รับเพิ่มขึ้นหรือสะสมจนถึงระดับหนึ่ง ร่างกายก็จะแสดงอาการเจ็บป่วยออกมา เช่นในระบบเลือดหากมีตะกั่วสูงกว่า 10 μg ต่อ 100 mL อาจทำให้โลหิตจาง เนื่องจากตะกั่วจะไปขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบินและเม็ดเลือด หรือเมื่อมีตะกั่วในเลือดเกินกว่า 16 μg ต่อ 100 mL จะมีผลต่อระบบประสาทและกล้ามเนื้อทำให้เกิดอาการประสาทหลอน ภาวะกระดูกพรุน อารมณ์แปรปรวน ชัก กล้ามเนื้ออ่อนแรง ตามัว และอาจรุนแรงถึงตาบอดได้ นอกจากนี้ยังทำให้ไตอักเสบ รวมทั้งมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ โดยเฉพาะผู้ที่ได้รับการสะสมติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้เป็นหมันได้

2.2.4 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยได้ออกกฎหมายกำหนดให้น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.2 mg/L ทำให้โรงงานต้องใช้วิธีการต่างๆ ในการกำจัดตะกั่วให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งส่วนใหญ่วิธีที่นิยมใช้กันมากคือ การเติมสารเคมีเพื่อให้ตะกั่วซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ หรือเรียกว่า การตกตะกอนทางเคมี (precipitation) โดยการเติมปูนขาว ($Ca(OH)_2$) หรือโซดาไฟ ($NaOH$) เพื่อให้ตกตะกอนในรูปเลดไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) หรือเติมโซดาแอช (Na_2CO_3) เพื่อให้ตกตะกอนในรูปเลดคาร์บอเนต ($PbCO_3$) และเติมฟอสเฟต เพื่อให้ตกตะกอนในรูปเลดฟอสเฟต ($Pb_3(PO_4)_2$) นอกจากนี้ยังใช้สารส้มเพอริส และเพอริซัลเฟตเป็นสารช่วยเร่งในการสร้างตะกอน (coagulant) เพื่อให้ตะกั่วเกิดการจับตัวและตกตะกอนลงมาได้อีกด้วย

โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนตะกั่วให้อยู่ในรูปเลดไฮดรอกไซด์ และเลดคาร์บอเนต ซึ่งในการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอเนตที่มีอยู่หรือที่เติมลงไป พีเอช รวมทั้งความสามารถในการละลายของสารประกอบตะกั่วในน้ำ หรือค่า K_{sp} พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนตะกั่วในรูปเลดไฮดรอกไซด์ คือ ช่วงประมาณ 9.5 – 10 และถ้าพีเอชมากกว่า 10 จะทำให้ประสิทธิภาพในการ

ตกตะกอนลดลง ดังรูปที่ 2.1 เนื่องจากอาจเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของตะกั่วที่ละลายน้ำได้ เช่น $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การตกตะกอนโลหะหนักที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ (Eckenfelder, 2000)

แม้ว่าการตกตะกอนจะเป็นวิธีที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาไม่แพง แต่ก็มีปัญหาตามมาหลายด้าน เช่น ใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน (sludge) ที่เกิดขึ้น การปรับพีเอชของน้ำหลังผ่านการบำบัดที่ค่อนข้างสูงให้ต่ำลงมา รวมทั้งปัญหาในการตกตะกอนได้ยากในกรณีที่ตะกั่วอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน เช่น PbEDTA เป็นต้น

2.3 ทองแดง

2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ทองแดงเป็นธาตุทรานสิชันตัวแรกของหมู่ IB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.546 มีความหนาแน่น 8.92 g/cm³ เป็นธาตุที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในรูปของแร่ส่วนใหญ่พบในรูปของซัลไฟด์ ได้แก่ คาลโคไซต์ (chalcocite) Cu₂S, โควเวลไลต์ (covellite) CuS, คาลโคไพไรต์ (chalcopyrite) CuFeS₂ และ โบไมต์ (bomite) Cu₃FeS₃ เป็นต้น ทองแดงเป็นโลหะที่มีความเหนียวและเนื้ออ่อน สามารถดัดให้มีรูปร่างตามที่ต้องการได้ มีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี (รองจากเงิน) มีจุดเดือด 2567⁰ C และจุดหลอมเหลว 1083⁰ C เป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีเลขออกซิเดชัน +1, +2 และ +3 แต่โดยทั่วไปจะพบทองแดงที่มีเลขออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) เท่านั้น ซึ่งในสารละลายคิวริกไอออน (Cu²⁺) จะเสถียรกว่าคิวรัสไอออน (Cu⁺) เนื่องจากคิวรัสไอออนจะเกิดออกซิเดชันและรีดักชันได้ง่ายกว่า แต่ความเสถียรของทั้ง Cu⁺ และ Cu²⁺ นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบหรือลิแกนด์ ค่าคงที่ในการละลาย และชนิดของอะตอมในผลึกด้วย ทองแดงละลายได้ดีในกรดซัลฟูริก และกรดไนตริก รวมทั้งสารละลายแอมโมเนียมไซยาไนด์ และโปตัสเซียมไซยาไนด์ โดยคิวริกไอออนส่วนใหญ่จะละลายได้ในน้ำ คิวริกไฮดรอกไซด์ (Cu(OH)₂) สามารถตกตะกอนเป็นตะกอนเบา หรือผลึกได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คิวริกไฮดรอกไซด์อาจเปลี่ยนเป็นคิวริกออกไซด์ (CuO) ซึ่งละลายได้ดีในกรดแก่ แต่บางครั้งอาจพบคิวริกไอออนอยู่ในรูปคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่น Cu₂SO₄·5H₂O รวมทั้งทองแดงยังสามารถเกิดเป็นสารประกอบของ ซัลไฟด์ อาร์ซีไนด์ คลอไรด์ และคาร์บอเนตได้เช่นกัน

2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์

มีการนำเอาสารประกอบทองแดงไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมหลายประเภท ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบทองแดงที่ใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม

ประเภทของสารประกอบทองแดง	ประเภทของอุตสาหกรรม
1. คิวปริกออกไซด์ (CuO)	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) แบตเตอรี่รี ลี ผลิตสารฆ่าแมลง เชื่อมโลหะ
2. คิวปริสออกไซด์ (Cu ₂ O)	ผลิตสารฆ่าเชื้อรา สารกั้นเสียนสี เซลล์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric cells) ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำเม็ดสีในแก้ว และกระจกเงา
3. คิวปริกอะซีเตต (Cu(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · H ₂ O)	ผลิตเม็ดสี สารฆ่าเชื้อรา สีย้อมผ้า ดอกไม้ประดับ
4. คิวปริกอะซีโตนาร์ซีไนท์ (Cu ₃ As ₂ O ₃ Cu(C ₂ H ₂) ₂)	ผลิตสารฆ่าแมลง สีที่ใช้ในทะเล
5. คิวปริกอะซีเนต (CuHAsO ₃)	ผลิตเม็ดสี สารรักษาน้ำเนื้อไม้ สารฆ่าเชื้อรา แมลงและหนู
6. คิวปริกคาร์บอเนต (CuCO ₃)	ช่วยรักษามลพิษพิษ ผลิตสารฆ่าเชื้อรา ทำดอกไม้เพลิง ผลิตเม็ดสี สารเติมแต่งในอาหาร (feed additive)
7. คิวปริกคลอไรด์ (CuCl ₂ · 2H ₂ O)	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารที่ใช้ติดสีย้อม ตัวตั้งซัลเฟอร์และใช้ดับกลิ่นของสารปิโตรเลียม ทำน้ำหมัก การชุบโลหะ ถ่ายภาพ เม็ดสี รักษาเนื้อไม้ สารป้องกันเชื้อรา
8. คิวปริโครเมต (CuCrO ₄)	สารฆ่าเชื้อรา รักษาเมล็ดพันธุ์ รักษาเนื้อไม้ รักษาเส้นใย และสิ่งทอ

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ประเภทของสารประกอบทองแดง	ประเภทของอุตสาหกรรม
9. คิวปริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Cu}(\text{OH})_2$)	การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ (rayon) แบตเตอรี่ อิเล็กโทรด สารที่ใช้ติดสีย้อม เม็ดสี สารฆ่าเชื้อรา แมลง ตัวเร่งปฏิกิริยา สารเติมแต่งในอาหาร รักษากระดาก
10. คิวปริกไนเตรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	การอัดรูปภาพ สารให้สี สารที่ใช้ติดสีย้อม ใช้ขัดเงาทองแดง สังกะสี และอลูมิเนียม สารรักษาเนื้อไม้ กำจัดวัชพืช เชื้อรา ผลิตดอกไม้ไฟ
11. คิวปริกซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	สารฆ่าเชื้อรา แบคทีเรีย กำจัดสาหร่าย สีย้อม การฟอกหนัง สารรักษาเนื้อไม้ การชุบโลหะ
12. คิวปริไซยาไนด์ (CuCN)	การชุบโลหะ สารฆ่าเชื้อรา แมลง สารกันเสียในสี ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (polymerization catalyst)
13. คิวปริกทังสเตต (CuWO_4) และ คิวปริสซีลีไนท์ (Cu_2Se)	สารกึ่งตัวนำ (semiconductors)

ข้อมูลในปี พ.ศ. 2536

2.3.3 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของเซลล์ เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์และเป็นสารประกอบที่สำคัญในโครงสร้างต่างๆ ของร่างกาย แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการย่อมส่งผลกระทบต่อ หรือก่อให้เกิดพิษได้ เช่น ทำให้เกิดการคลื่นเหียนอาเจียน ปวดท้อง เลือดออกในกระเพาะ ท้องร่วง หรือถ้าได้รับในปริมาณมาก จะทำให้เกิดโรคโลหิตจางและทำให้เกิดโรคชนิดหนึ่ง เรียกว่า “โรควิลสัน” โดยผู้ป่วยจะมีการสะสมทองแดงในตับมากกว่าปกติ เนื่องจากร่างกายไม่สามารถขับทองแดงออกทางท่อน้ำดีเข้าสู่ลำไส้ได้ และเมื่อตับมีทองแดงอึดตัว ทองแดงก็จะแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือด ทำให้ทองแดงไป

พอกอยู่ตามอวัยวะต่างๆ ที่สำคัญ เช่น สมอง กระจุกตา และไต ซึ่งทำให้อวัยวะเหล่านี้พิการได้ (โชคชัย ยะชูศรี, 2536)

2.3.4 การกำจัดทองแดงในน้ำเสีย

ในปัจจุบันประเทศไทยได้ออกกฎหมายกำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณทองแดงได้ไม่เกิน 2 mg/L โดยทองแดงในน้ำเสียนั้นจะพบอยู่ในหลายรูปแบบ เนื่องจากกระบวนการทางเคมีและการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเกลือหรือตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ต้องเลือกใช้วิธีที่มีความเหมาะสมในการกำจัด ส่วนมากจะนิยมใช้วิธีทำให้ตกตะกอนหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การระเหย (evaporation) และกระบวนการทางไฟฟ้า (electrodialysis) เป็นต้น การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง แม้ว่าเรซินที่ใช้แล้วจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการทำรีเจนเนอเรชัน (regeneration) ด้วยกรด แต่เมื่อใช้งานไปนานๆ ประสิทธิภาพของเรซินก็จะค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก หรือกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทองแดงน้อยกว่า 200 mg/L (Eckenfelder, 2000) ส่วนกระบวนการตกตะกอนของทองแดง ณ พีเอชที่เป็นค่าด้วยการเติมสารเคมี ได้แก่ โซดาไฟ (NaOH) เพื่อให้ทองแดงตกตะกอนในรูปคิวปริกไฮดรอกไซด์ และจะเกิดได้ดี เมื่อพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 9.0 – 10.3

2.4 ซิลิกา เจล (Silica Gel)

2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ซิลิกา เจล คือซิลิการูปหนึ่งที่ตั้งตระหง่านขึ้นในรูปของ ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นของแข็งอสัณฐานที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิว (specific surface area) มากกว่า $5 \text{ m}^2/\text{g}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$ มีตั้งแต่เป็นก้อนแข็งจนถึงเป็นผงละเอียด ภายในมีรูพรุน ขนาดตั้งแต่ $5 \text{ \AA} - 3000 \text{ \AA}$ ซึ่งอาจจัดแบ่งขนาดของรูพรุนจากกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภทคือ ซิลิกา เจล ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (narrow pore silica gels) มีขนาดของรูเฉลี่ยประมาณ 20 \AA และซิลิกา เจล ที่มีรูพรุนกว้าง (wide pore silica gels) มีขนาดของรูเฉลี่ย 110 \AA หรือมากกว่า ซิลิกา เจล มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ของซิลิกาที่ต่อกันเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ที่เกิดจากการโพลิเมอร์ไรซ์ของกรดซิลิซิก มีสูตรทั่วไปคือ $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ โดยซิลิกา เจลที่มีอนุภาคขนาดเล็กหรือมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยเรียกว่า ซิลิกา พาวเดอร์ ซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าซิลิกา เจล

ซิลิกา เจลเป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้ไม่บวมเมื่อสัมผัสกับสารละลายและยังคงโครงสร้างเดิมไว้ได้ การเปลี่ยนซิลิกา เจลที่ไม่มีน้ำ (anhydrous silica gel) ไปเป็นซิลิกา เจลที่มีน้ำ (soft gel) ต้องใช้น้ำ 100 ส่วนต่อซิลิกา เจล 1 ส่วน แต่ความคงตัวของซิลิกา เจลยังต้องขึ้นกับปัจจัยของความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายด้วยเช่นกัน โดยซิลิกา เจลสามารถละลายได้ที่ pH สูงกว่า 7 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ pH สูงกว่า 7.5 และที่ pH ต่ำกว่า 2 ซึ่ง ซิลิกา เจลจะละลายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว การดูดซับบนซิลิกา เจลโดยทั่วไปเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดจากปฏิกิริยาของแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interactions) และแรงจากการรวมตัวกันของน้ำ (capillary condensation) ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

2.4.2 ลักษณะพื้นผิวของซิลิกา เจล แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

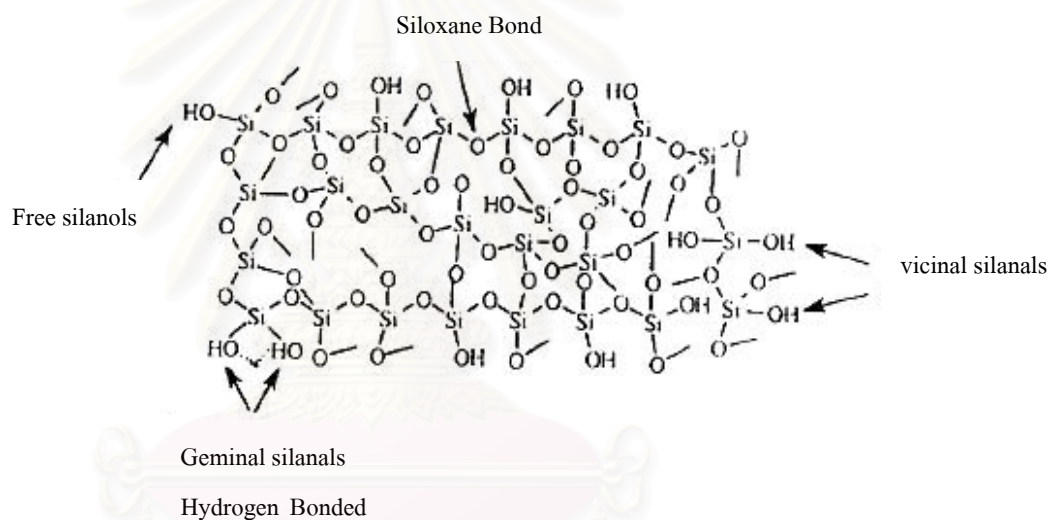
(1) พื้นผิวไฮดรอกซิลเลต (hydroxylated surface) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ทันทีและการทำให้ซิลิกา เจลแห้งต้องได้รับความร้อนอย่างน้อย 150°C โดยหมู่ไฮดรอกซิลแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ free silanol, geminal silanol และ vicinal silanol ดังรูปที่ 2.2

- * Free silanol คือหมู่ไฮดรอกซิลที่แยกตัวอยู่เดี่ยวๆ บนพื้นผิวของซิลิกา เจล
- * Geminal silanol คือหมู่ไฮดรอกซิลสองหมู่ที่ต่อยู่นบนซิลิกอนอะตอมเดียวกัน
- * Vicinal silanol คือหมู่ไฮดรอกซิลสองหมู่ที่ต่อยู่นบนซิลิกอนที่เชื่อมต่อกัน

(2) พื้นผิวซิลอกเซน (siloxane surface) มีหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) ที่เกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากหมู่ซิลานอล เมื่อได้รับอุณหภูมิ 1000°C

(3) พื้นผิวออร์แกนิก (organic surface) เกิดเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี หรือฟิสิกส์ ของพื้นผิวซิลิกา กับโมเลกุล หรืออนุภาคต่างๆ โดยคุณสมบัติของพื้นผิวชนิดนี้อาจเป็น

- * ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เมื่อพื้นผิวซิลิกาเกิดพันธะกับสารไฮโดรคาร์บอน
- * ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) เมื่อพื้นผิวซิลิกาเกิดพันธะกับอะตอมที่มีสภาพขั้วสูง
- * ไฮโดรโฟบิก และไฮโดรฟิลิก เมื่อพื้นผิวซิลิกาเกิดพันธะกับฟลูออโรคาร์บอน



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา เจล (Thurman และ Mills, 1998)

2.4.3 ประโยชน์ของซิลิกา เจล

ซิลิกา เจล หรือ ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีลักษณะเด่นทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิว โดยเฉพาะพื้นผิวของซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งลักษณะของการนำไปใช้ประโยชน์นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบและความบริสุทธิ์ที่ผลิตได้ ประโยชน์ของซิลิกา เจล มีดังนี้

- (1) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นแก่สารอื่น เช่น ยางพลาสติก และสารโพลีเมอร์ เป็นต้น

- (2) เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของของแข็ง เช่น เป็นตัวกันการเกาะกันเป็นก้อน (anticracking) ในเครื่องสำอางและทางเภสัชกรรม
- (3) เป็นสารเพิ่มแรงยึดโดยเฉพาะในกาบ และเพิ่มความหนืดในของเหลว เช่น จาระบี สี หมึก ยา และเครื่องสำอาง เป็นต้น
- (4) เป็นสารเพิ่มความเงา (optical effects)
- (5) เป็นสารลดแรงตึงผิว เช่น สารป้องกันการเกิดโฟม
- (6) เป็นสารเพิ่มช่วยกันน้ำ (hydrophobing, water-repellent)
- (7) เป็นสารดูดซับ (adsorbent)
- (8) เป็นตัวพาตะลิสต์ และตัวพาอะตะลิสต์ (catalyst carrier)
- (9) เป็นสารตั้งต้นในการทำให้เกิดเมฆ (cloud seeding)
- (10) ใช้บรรจุคอลัมน์เพื่อการวิเคราะห์ทางโครมาโตกราฟี (chromatography column packing)

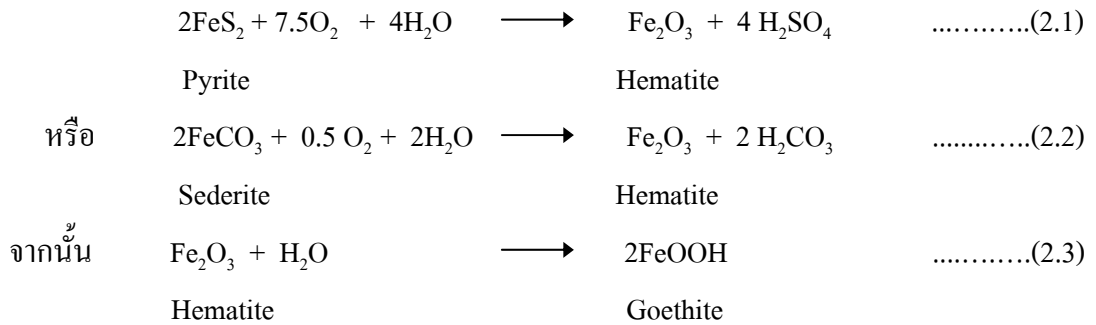
สำหรับซิลิกา เจล ที่ใช้ในงานวิทยาศาสตร์นั้นส่วนมากจะใช้เป็นตัวพาอะตะลิสต์ (catalyst carrier) และใช้เพื่อการวิเคราะห์ทางโครมาโตกราฟี เป็นหลัก

2.5 เหล็ก (Iron)

2.5.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม

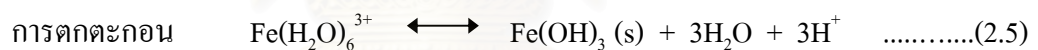
เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่บนผิวโลกมากเป็นอันดับสองรองจากอะลูมิเนียม พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งบนดินและในน้ำอยู่ในรูปของสารประกอบของเหล็กและออกซิเจน หรือเรียกโดยรวมว่า เหล็กออกไซด์ (iron oxide) นอกจากนี้ยังมีไอรอนซัลไฟด์ หรือไพไรต์ (FeS_2) ซึ่งเป็นสินแร่ชนิดหนึ่งที่ไม่เสถียรเมื่ออากาศชื้นและถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย

เหล็กออกไซด์ มีอยู่ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนที่เกาะอยู่กับเหล็กว่ามากน้อยเพียงใด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe^{2+}) มีสีเขียวเทา หรือน้ำเงิน และสารประกอบเฟอร์ริก (Fe^{3+}) มีสีเหลือง แดง หรือน้ำตาล ในดินส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสินแร่ที่เรียกว่าฮีมาไทต์ (hematite, Fe_2O_3) และเกอร์ไทต์ (goethite, FeOOH) ซึ่งมีสีเหลืองส้ม โดยเกอร์ไทต์เกิดมาจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไพไรต์ (pyrite) และซิเดอไรต์ (siderite) โดยอาศัยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดออกซิเดชันจาก Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในธรรมชาติ โดยสารประกอบของเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดิน และส่งผลอย่างมากกับสีของดินที่ปรากฏ

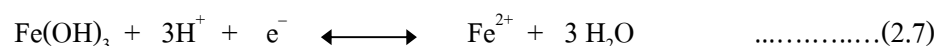
ส่วนเหล็กที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติมีได้หลายรูปแบบ ได้แก่ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเป็นไอออนอิสระที่สามารถสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ ในน้ำได้ และปรากฏอยู่ในรูปของไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (hydrate ion) หรือ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_x^{n+}$ โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับว่าเป็นเหล็กที่อยู่ในรูป (species)ใด ตัวอย่างเช่น



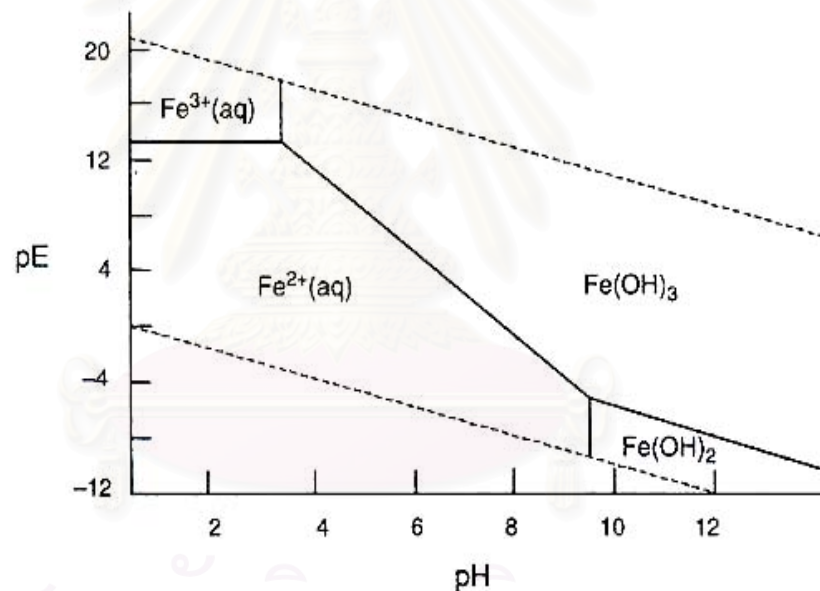
รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาได้กับแอนไอออนของสารอินทรีย์หรือกับสารอนินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (metal complex) หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (organometallic compound) ได้อีกด้วย

2.5.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก

ปฏิกิริยาเคมีที่มีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำเสีย คือปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เหล็กในรูปของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ไอออนที่ละลายน้ำได้เหล็กจึงถูกปลดปล่อยและเกิดการปนเปื้อนดังสมการ (2.7)



โดยในการอธิบายถึงระบบที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรหลายตัวเกิดขึ้นพร้อมกัน การสร้างไดอะแกรมแบบสองตัวแปร (two-variable diagram) เพื่อใช้ศึกษาจึงมีความแม่นยำกว่าพิจารณาได้จาก pE/pH ไดอะแกรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าเลขตรอนแอคทีวิตี (electron activity : a_e) และค่าไฮโดรเจนแอคทีวิตี (hydrogen activity : pH) ที่สามารถบอกถึงสภาวะออกซิไดซ์และสภาวะรีดิวซ์ (oxidizing and reducing) ของระบบได้ แต่เนื่องจากระดับของอิเล็กตรอนแอคทีวิตีของน้ำแปรผันได้ในช่วงกว้างมาก จึงนิยมให้ pE เป็นตัวแทนในการแสดงค่าอิเล็กตรอนแอคทีวิตี โดย $pE = -\log a_e$ ดังนั้นเมื่อ pE มีค่าเป็นลบ แสดงว่าสารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอคทีวิตีสูง ระบบจึงอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ในขณะที่เมื่อค่า pE เป็นบวก นั่นคือในสารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอคทีวิตีต่ำ ระบบจึงอยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ โดย pE ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง 25 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลง และรูปแบบหลัก (dominant species) ของไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก (Vanloon และ Duffy, 2000)

นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ยังแตกต่างกันแม้ที่ระดับพีเอชเท่ากัน เกิดจากค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการละลายที่ต่างกัน โดยสารที่มีค่าคงที่ของการละลายมาก หมายถึงสามารถละลายได้มากและการตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ ดังตารางที่ 2.3 ที่แสดงค่าคงที่การละลายของสารประกอบของเหล็กที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบของเหล็ก (Ghosh, 1965)

ปฏิกิริยา		K_{sp} ที่ 25°C
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) *$	$\longleftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{OH}^-$	8.00×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$	$\longleftrightarrow \text{FeOH}^+ + \text{OH}^-$	4.00×10^{-10}
$\text{FeCO}_3(\text{s})$	$\longleftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	2.11×10^{-11}
$\text{FeCO}_3(\text{s}) + \text{OH}^-$	$\longleftrightarrow \text{FeOH}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	5.05×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) + \text{OH}^-$	$\longleftrightarrow \text{Fe(OH)}_3^-$	8.30×10^{-6}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s})$	$\longleftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	4.00×10^{-38}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s})$	$\longleftrightarrow \text{Fe(OH)}_2^+ + \text{OH}^-$	5.13×10^{-17}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s})$	$\longleftrightarrow \text{Fe(OH)}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.57×10^{-26}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) + \text{OH}^-$	$\longleftrightarrow \text{Fe(OH)}_4^-$	1.00×10^{-5}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s})$	$\longleftrightarrow \text{Fe(OH)}_3(\text{d})^{**}$	2.90×10^{-7}

* $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$ หมายถึงเฟอร์ริสไฮดรอกไซด์ในสถานะของแข็ง

** $\text{Fe(OH)}_3(\text{d})$ หมายถึงเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่ไม่แตกตัวในสารละลาย

2.5.3 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxides)

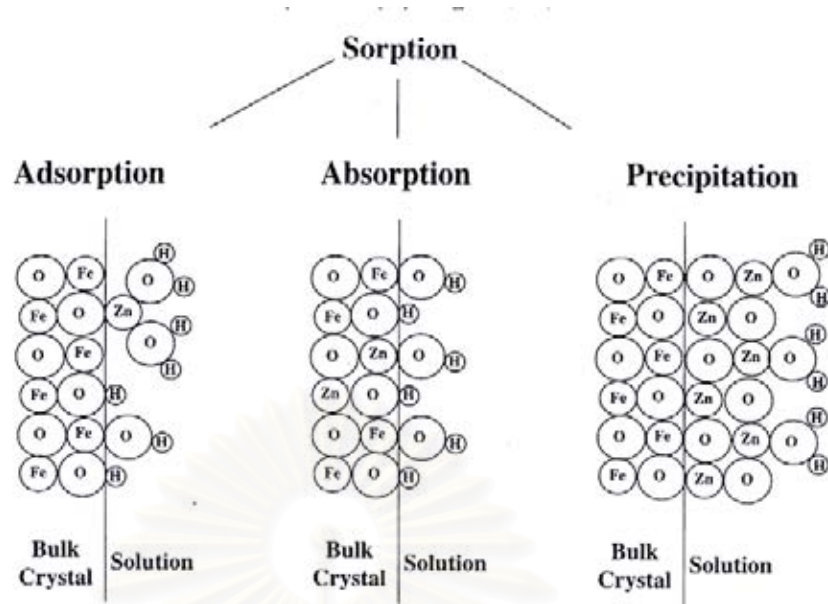
เหล็กออกไซด์เป็นไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (hydrated metal oxide) เนื่องจากเป็นของแข็งที่มีส่วนประกอบของไอออนบวกของโลหะรวมตัวอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งครอบคลุมถึงสารประกอบของโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซิไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) ที่มีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวที่ถูกไฮเดรตได้ง่าย สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งใน ดิน ดินเหนียว และตะกอนต่างๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุเหล่านั้น มีรูปแบบทางเคมี เช่น Fe(OH)_3 (ferric hydroxide), FeO (ferrous oxide), Fe_2O_3 (ferric oxide หรือเรียกว่า hematite), Fe_3O_4 ซึ่งคือ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ferrous ferric oxide หรือเรียกว่า magnetite) และ FeOOH เรียกว่า goethite โดย poorly crystalline หรือ amorphous hydrated ferric oxide ซึ่งอยู่ในรูปของ α , β หรือ γ จะเรียกว่า ferrihydrite เป็นต้น

เหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับสภาวะในการก่อตัว ตัวอย่างเช่น เกอร์ไรท์ (FeOOH) และ ฮีมาไทท์ (Fe_2O_3) เกิดจากเหล็กที่อยู่ในรูปของออกซิไฮดรอกไซด์และออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งเกิดได้จากการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (sol-gel processing) ของสารละลายของเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งในสภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำหรือ pH สูง แต่อุณหภูมิต่ำจะชัก

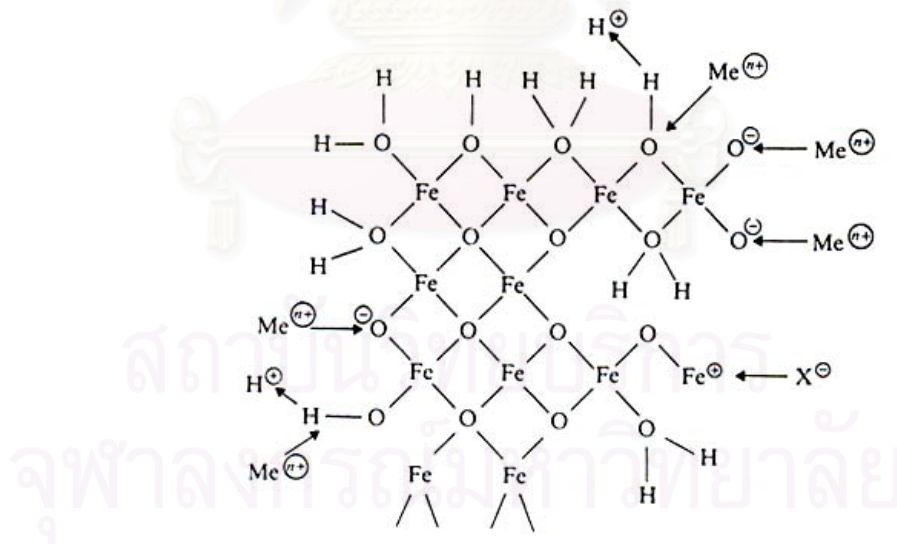
นำไปสู่การเกิดเกอร์ไทต์ ส่วนสภาวะที่ pH ต่ำ ($\text{pH} < 4$) และอุณหภูมิสูงๆ จะชักนำให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ อย่างไรก็ตามเมื่อปรับ pH ให้สูงขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำสารละลายเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะเกิดเป็น amorphous ferrihydrite (FeOOH) ซึ่งมีขนาดอนุภาค 3-5 nm หลังจากล้างและทำให้แห้งแล้วจะมีพื้นผิว 225-340 m^2/g ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง ประมาณ 4 nm แต่ถ้าให้ความร้อนที่ 400-700 $^{\circ}\text{C}$ ก็จะทำให้เกิดเป็นฮีมาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 nm โดยมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือน้อยกว่า 20 m^2/g และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงโดยเฉลี่ยเป็น 100 nm ส่วนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Fe_2O_3 หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$

2.5.4 การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์

เมื่อออกไซด์ของเหล็กสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (amphoteric) กล่าวคือ สามารถรับอิเล็กตรอนหรือปล่อยโปรตรอนก็ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะจึงมีได้หลายแบบ เรียกโดยรวมว่า sorption ซึ่งมีทั้งการดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (precipitation) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดเพียงกระบวนการเดียว สองกระบวนการ หรือทั้งหมดร่วมกัน โดยในการศึกษานี้สนใจและกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์ (Koretsky, 2000)



X⁻ คือ แอนไอออน ได้แก่ PO₄³⁻ เป็นต้น
 Meⁿ⁺ คือ แคทไอออน ได้แก่ Pb²⁺, Zn²⁺ เป็นต้น

รูปที่ 2.5 การดูดซับแคทไอออนและแอนไอออนบริเวณผิวของไฮดรตเหล็ก(III) ออกไซด์ (O'Neill, 1993)

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับหรือกระบวนการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้า โดยเฉพาะตรงบริเวณผิวสัมผัส ดังรูปที่ 2.4 โดยจะมีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ ส่วนกระบวนการดูดซึม (absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งระบบโดยเกิดขึ้นทั่วทั้งวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยา เช่นการดูดซึมของแก๊สออกซิเจนสู่น้ำ เป็นต้น โดยสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) และสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า adsorbate การดูดซับสามารถเกิดขึ้นทั้งทางกายภาพ (physisorption) และทางเคมี (chemisorption) เมื่อโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สหรือของเหลวยึดติดกับผิวของของแข็งเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นตัวดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารในของเหลว

การใช้ตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดี เนื่องจากเป็นระบบที่มีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออย่างมากหากเป็นการบำบัดโดยใช้วิธีการทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังใช้พื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นเป็นที่น่ารังเกียจ รวมทั้งไม่มีสลัดจ์ และเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

2.6.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และเกาะติดที่ผิวของแข็ง เนื่องจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ ซึ่งการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

2.6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) ซึ่งเป็นแรงที่มีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิดเกิดจากการดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ได้แก่ dipole – dipole interaction การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayer) กล่าวคือ จำนวนชั้นของโมเลกุลที่ผิวของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นหรือเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ outer-sphere surface reaction ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

ทั้งนี้การดูดซับทางกายภาพมักเป็นแบบไม่เฉพาะเจาะจง (non-specific) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้จะไม่ดูดติดกับเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนผิวหน้าของแข็ง แต่จะเป็นอิสระในการเคลื่อนที่อยู่เหนือบริเวณผิวนั้น และกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะสามารถผันกลับได้ (reversible) ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดมีค่าน้อยจะสามารถเกิดการปลดปล่อยสารที่ถูกดูดซับออกมา (desorption) ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไป

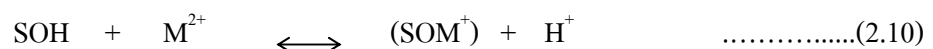


เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกไซด์ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกไซด์เป็น binding site

M^{2+} คือ แคทไอออนที่มีประจุ +2

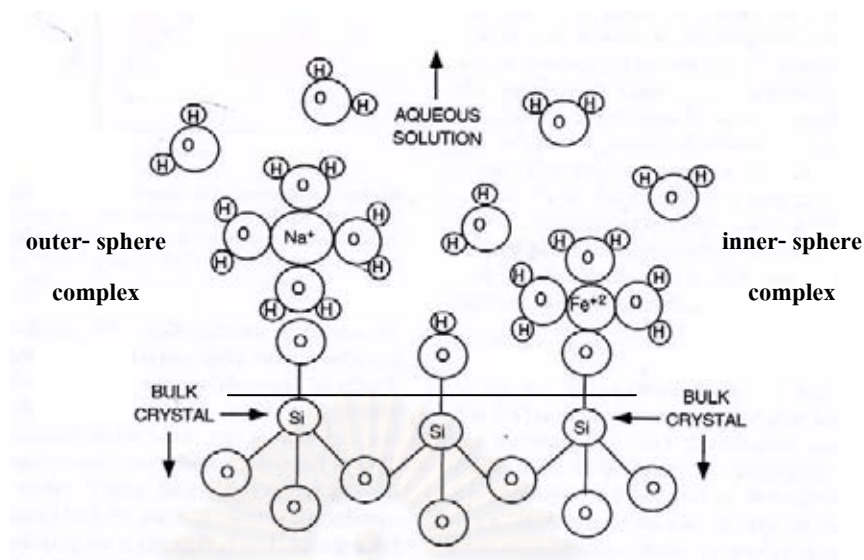
2.6.1.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับเกิดเป็นพันธะทางเคมีหรือพันธะโคเวเลนต์ (covalent or chemical bond) ซึ่งเป็นพันธะที่สั้นและแข็งแรงกว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับทางกายภาพ โดยจะเกิดที่ตำแหน่งจำเพาะหรือบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ (surface functional group) ดังนั้นโมเลกุลจึงไม่สามารถสะสมได้มากกว่าหนึ่งชั้น นั่นคือจะเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) และโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างอิสระจากบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับไปยังบริเวณอื่น เมื่อผิวหน้าของสารดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุล 1 ชั้นแล้ว ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดน้อยลงและเกิดการผันกลับได้ยาก ซึ่งกระบวนการอาจเกิดได้ช้าและผันกลับไม่ได้ (irreversible) หรือเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ inner-sphere surface reaction ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11)



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกไซด์ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกไซด์เป็น binding site

M^{2+} คือ แคทไอออนที่มีประจุ +2



รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาแบบ inner – sphere และ outer – sphere complexation (Koretsky, 2000)

2.6.2 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี

(1) การดูดซับทางกายภาพไม่มีการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเลคตรอนร่วมกัน ทำให้สามารถย้อนกลับหรือเกิดการปลดปล่อยสารออก (desorption) ได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการดูดซับทางเคมี จะเกิดเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้นทำให้ไม่สามารถผันกลับได้

(2) การดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะติดยังบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่ส่วนใดก็ได้ ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีอิสระในการเคลื่อนย้ายได้ตลอดทั่วทั้งพื้นที่ผิว ต่างกับการดูดซับทางเคมีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเกิดได้เฉพาะที่ และไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้

(3) การดูดซับทางกายภาพเป็นการเกิดแบบ multilayers กล่าวคือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่เกาะอยู่บนผิวของตัวดูดซับสามารถเกิดได้หลายชั้น ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบ monolayer คือเป็นการดูดซับติดผิวแบบชั้นเดียว และเมื่อเกิดอย่างสมบูรณ์แล้ว อาจเกิดการดูดซับทางกายภาพที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีได้อีก

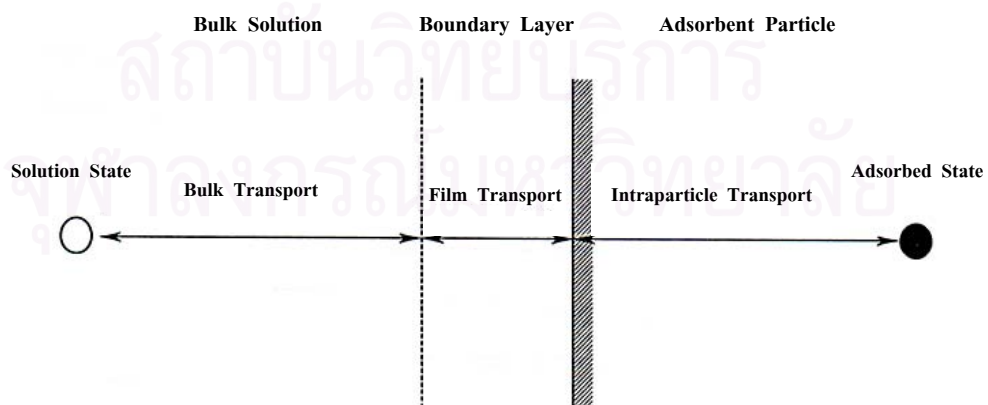
2.6.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการดูดซับเป็นกลไกของการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ซึ่งขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับทั้งหมดของสารละลายด้วยตัวดูดซับที่มีรูพรุน ดังรูปที่ 2.7

(1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายถูกส่งผ่านไปยังผิวหน้าของชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ และเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเร็วมาก

(2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวบางๆ เข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับทำให้เกิดกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) หรือเรียกว่า การแพร่ภายนอก (external diffusion) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

(3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายซึ่งอยู่ที่ผิวหน้าของตัวดูดซับแพร่ผ่านเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (pore diffusion) ทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน หรือเรียกว่า การแพร่ภายใน (internal diffusion) และเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน (Eckenfelder, 1981)

2.6.4 สมดุลของการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งก่อนจะถูกดูดซับเข้าไปใหม่ จนเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการปลดปล่อยสารเข้าสู่ภาวะคงที่ ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับอีก เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) หรือเรียกสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิของระบบคงที่ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) โดยได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น แบบจำลองที่นิยมใช้ ได้แก่

2.6.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแลงเมียร์ ดังสมการที่ (2.12) เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model ใช้อธิบายการดูดซับที่มีสมมติฐาน ดังนี้

- (1) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับอยู่บริเวณพื้นผิวที่จำกัดของตัวดูดซับ
- (2) บริเวณที่เกิดการดูดซับจะเกิดได้เพียงชั้นเดียว (monolayer)
- (3) พื้นที่ที่ถูกดูดซับมีจำนวนจำกัด ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิวนั้นๆ
- (4) พลังงานในการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

$$X = \frac{X_m b C_e}{(1 + b C_e)} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

โดย $X = x/m$ คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

$X_m =$ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สามารถเกิดการดูดซับได้เพียงชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

$C_e =$ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

$b =$ ค่าคงที่ของพลังงานในระบบ

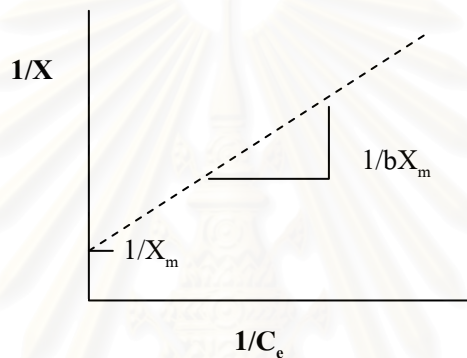
จากสมการที่ (2.12) เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าสู่ ∞ (infinity) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \left(\frac{1}{bX_m} \right) + \left(\frac{C_e}{X_m} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \left(\frac{1}{X_m} \right) + \left(\frac{1}{C_e} \right) \left(\frac{1}{bX_m} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

และเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.6.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟรุนด์ลิช ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับในระบบของเหลวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังเป็นไปตามสมการที่ (2.15)

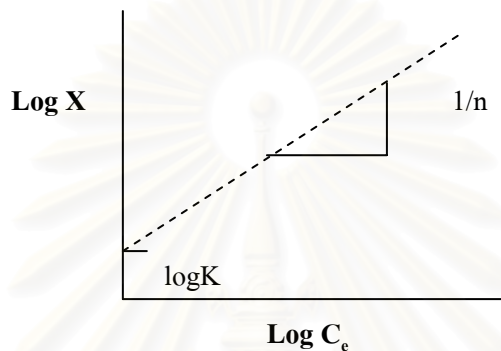
$$X = KC_e^{1/n} \dots\dots\dots (2.15)$$

- โดย $X = x/m$ คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ โมลต่อลิตร
- K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ
- $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ (2.15) ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบเอกโปเนนเชียล (exponential) สามารถเขียนให้ เป็นสามารถเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของ logarithmic ได้ดังนี้

$$\text{Log}X = \text{Log}K + \left(\frac{1}{n}\right)\text{Log}C_e \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง logX กับ logC_e จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน 1/ n และ จุดตัดแกน y เท่ากับ log K



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

2.6.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที

(BET, Brunauer Emmerett – Teller Adsorption Isotherm)

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาจาก Brunauer, Emmerett และ Teller เพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งพัฒนามาจากสมการของแลงเมียร์ โดยมีสมมติฐานว่า แต่ละโมเลกุลของการดูดซับในชั้นแรก จะเป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป ดังสมการ (2.17)

$$X = \frac{X_m b C_e}{(C_s - C_e)[1 + (b - 1)(C_e / C_s)]} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

โดย X = x/m คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือ โมลต่อกรัม
 X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ต้องการสำหรับเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัมหรือ โมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย
 มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ โมลต่อลิตร

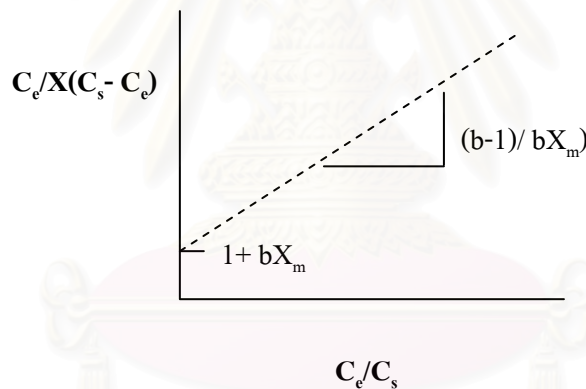
C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วย
 เป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ โมลต่อลิตร

b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

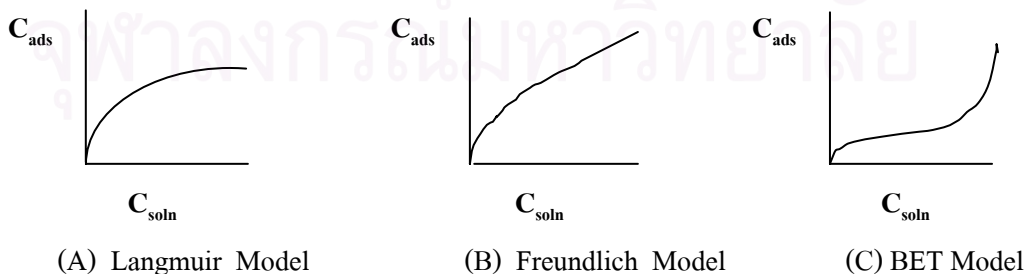
จากสมการที่ (2.17) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น ดังนี้

$$\frac{C_e}{X(C_s - C_e)} = (1 + bX_m) + \left[\frac{(1-b)}{(bX_m)(C_e/C_s)} \right] \dots\dots\dots(2.18)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/X(C_s - C_e)$ กับ (C_e/C_s) จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $(b-1)/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1 + bX_m$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบ BET



รูปที่ 2.11 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ เมื่อ C_{soln} คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย และ C_{ads} คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ

2.6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

(1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (size and surface area) ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับ โดยอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับเมื่อตัวดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ในขณะที่ตัวดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่ของสารเข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนจะถูกควบคุมโดยความต้านทานของการแพร่ภายนอก หรือการขนส่งชั้นฟิล์ม (external diffusion หรือ film diffusion) ทำให้อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ แต่หากการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคของตัวดูดซับเป็นตัวควบคุม อัตราการดูดซับจะทำให้อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับได้เช่นกัน นั่นคือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของตัวดูดซับ

(2) ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ (nature of adsorbate) การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากน้ำหรือตัวทำละลายและเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นสารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงทำให้การดูดซับเกิดได้ไม่ดี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอินทรีย์จะลดลง เมื่อขนาดสายไฮโดรคาร์บอนยาวขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับด้วยเช่นกัน

(3) พีเอช (pH) ของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการกำหนดความสามารถของการดูดซับ เนื่องจากพีเอชหรือไฮโดรเจนไอออนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวและการละลายน้ำของไอออนต่างๆ ประกอบกับค่าของ zero point of charge (zpc), point of zero charge (pzc) หรือ pH zero (pH_0) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงผลรวมของประจุบวกและประจุลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีความสมดุลกัน โดยถ้าพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่าค่า pH_0 ของตัวดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับก็จะกลายเป็นประจุลบที่สามารถดูดซับประจุบวกได้ ในทางกลับกันหากพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่า pH_0 ของตัวดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับก็จะกลายเป็นประจุบวกที่สามารถดูดซับกับประจุลบได้เช่นกัน (Vanloon และ Duffy, 2000)

(4) อุณหภูมิ (temperature) เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น

ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับกลับเพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง

(5) ความเร็วในการเขย่า (mixing speed) เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับแพร่ภายนอกหรือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (external diffusion หรือ film diffusion) และการแพร่ภายในหรือการแพร่เข้าสู่โพรง (internal diffusion หรือ pore diffusion) ถ้าระบบเป็นของเหลว (เช่น น้ำ) และมีความเร็วในการเขย่าต่ำ ฟิล์มของน้ำที่ ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ กรณีนี้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้า การเขย่ามีความเร็วสูงขึ้น ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงและทำให้โมเลกุลเคลื่อนเข้าไปหาตัวดูดซับ ได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับแทนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซิลิกา เจล ประกอบด้วยหมู่ซิลินอลที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อยู่บนพื้นผิวโดยรอบ การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของซิลิกาเจล ทำให้หลายวิธีขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ที่ต่างกัน วิธีการหนึ่งที่สามารถดัดแปลงพื้นผิวของซิลิกา เจล คือ การปรับปรุงพื้นผิวด้วยออกไซด์ของโลหะโดย กระบวนการ impregnation ที่เกิดจากการทำให้มีตัวร่วมกับการตกตะกอน และเกิดการรวมตัวขึ้น แทนที่ ในขณะที่ระเหยเอาตัวทำละลายออกไป ซึ่งการเคลือบเหล็กออกไซด์บนซิลิกา เจล ก็เป็น วิธีการหนึ่งของการปรับปรุงพื้นผิวในลักษณะนี้

สำหรับในส่วนของการวิจัยที่เกี่ยวกับการเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวของซิลิกา เจล โดยเฉพาะซิลิกา เจลที่ใช้แล้วที่ผ่านมายังไม่เคยมีการทดลอง ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างที่ศึกษาเกี่ยวกับ เหล็กออกไซด์ที่ใช้เคลือบบนตัวกลาง รวมทั้งการดัดแปลงซิลิกา เจลเพื่อใช้ในการกำจัด โลหะหนัก ดังนี้

Edward และ Benjamin (1989) ศึกษาการฟื้นอำนาจ (regeneration) และการนำกลับมา ใช้ใหม่ของ ferrihydrite (เหล็กออกไซด์) ในการบำบัดโลหะหนักออกจากรน้ำเสีย โดยทำการเปรียบเทียบกับการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ พบว่า ferrihydrite สามารถกำจัด Cu, Cd, Zn, Cr (III), Ni และ Pb ได้ทุกค่าของพีเอช (3-13.5) แต่จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 8 – 12.5

ในขณะที่การตกตะกอนจะทำได้ไม่ดีเท่า รวมทั้ง ferrihydrite ยังสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่อย่างน้อยถึง 50 ครั้ง โดยใช้ได้ทั้งกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

Edward และ Benjamin (1989) ได้ทำการศึกษาลักษณะประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก (Pb, Cu, Ni, Cd, Cr(III)) และสารประกอบเชิงซ้อนของแอมโมเนียกับโลหะหนัก (Cd, Zn และ Cu) ด้วยทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จากการตกผลึกและการให้ความร้อน พบว่าทรายที่เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าทรายปกติ และสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกเมื่อทำการล้างย้อนด้วยกรดที่พีเอช 3 โดยการกำจัดขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายที่เข้าไปในระบบและจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูง

Scheidegger และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของทราย (silica sand) ที่เคลือบด้วยเกอร์ไทต์ จากการศึกษาเกี่ยวกับพีเอชและ ionic strength ในการก่อตัวของเหล็กออกไซด์ โดยพบว่าปฏิกิริยาเริ่มแรกในการสัมผัสของเกอร์ไทต์บนพื้นผิวทรายเกิดมาจากแรงทางไฟฟ้า (electrostatic attraction) และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X - ray photoelectron spectroscopy (XPS) สรุปได้ว่าการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมีคือ Fe-O-Si ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา $-Fe-OH + HO-Si- \longrightarrow Fe-O-Si- + H_2O$ และเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง โดยอาจจะเป็นพันธะที่เกิดขึ้นจากการเคลือบของเหล็กออกไซด์บนผิวของแร่ธาตุหรืออนุภาคของดินที่มีในธรรมชาติด้วย

Benjamin และคณะ (1996) ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก สารประกอบเชิงซ้อนของแอมโมเนียกับโลหะหนัก (Cu, Cd, Pb, Ni และ Zn) และออกซีแอนไอออนของโลหะหนัก (SeO_3 , AsO_3) ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทั้งจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดโลหะทั้งสามประเภทได้อย่างดี โดยตัวดูดซับนี้มีความเสถียรทั้งการล้างย้อนและการนำกลับมาใช้ใหม่ (back washing and regeneration) ซึ่งจะปลดปล่อยโลหะหนักออกมาได้มากใกล้เคียงกับที่ดูดซับไป ยกเว้น AsO_3 ที่ไม่สามารถนำกลับมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะใช้กรดหรือด่างในการทำรีเจนเนอเรชัน

Lo และคณะ (1997) ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของการดูดซับที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นของเหล็ก และอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และเครื่อง X - Ray Diffractometer (XRD) จากการทดลองแบบแบตช์ และใช้เทคนิค Energy Dispersive Analysis of X - Ray (EDAX) เพื่อหาลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากเส้นสเปกตรัมของธาตุ

ที่ปรากฏหลังจากนำตัวอย่างทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับและผ่านการล้างแล้วไปวิเคราะห์ โดยหากมีการเปลี่ยนแปลงของธาตุหรือองค์ประกอบเกิดขึ้น แสดงว่าการดูดซับนั้นเป็นการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นหากเป็นการดูดติดทางกายภาพ ผลการทดลองสรุปได้ว่า ทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะประกอบด้วยรูพรุนและพื้นผิวที่มีความเฉพาะตัวสูงเนื่องจากการมีเหล็กออกไซด์ไปเกาะติดอยู่ โดยการเคลือบที่พีเอชสูง ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีแนวโน้มจะเกิดเป็นเกอร์ไทต์ และมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดี แต่มีความสามารถในการต้านทานกรดต่ำ ในขณะที่การเคลือบที่อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มความเสถียรของออกไซด์ที่เคลือบอยู่ โดยมีฮีมาไทต์เป็นรูปแบบหลักที่เกิดขึ้น

Lai และคณะ (2000) ศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยไอออนของคอปเปอร์บนพื้นผิวของทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยเทคนิค BET และ Scanning Electron Micro scope (SEM) รวมทั้ง Energy Dispersive Analysis of X – Ray (EDAX) ผลที่ได้พบว่าบนผิวของทรายที่ถูกเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวที่มีลักษณะเฉพาะตัวสูงเนื่องจากการมีเหล็กออกไซด์ไปเกาะติดอยู่ ทำให้ไอออนของโลหะสามารถแทรกซึมเข้าไปยังช่องว่างขนาด micropores และ mesopores ของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของทรายได้ โดยตัวดูดซับยังสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่เมื่อทำการล้างด้วยกรดที่พีเอช 3 นอกจากนี้ผลของ EDAX สรุปได้ว่า การดูดซับไอออนของคอปเปอร์บนพื้นผิวของทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นการดูดติดผิวทางเคมี เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Lo และคณะในปี 1997

Lai และคณะ (2000) ศึกษาการดูดซับของคอปเปอร์และตะกั่วในสภาวะที่มีการแข่งขันกันด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยทำการศึกษาทั้งแบบเบดซ์และคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและคอปเปอร์เป็น 5×10^{-5} M และ 1×10^{-4} M ตามลำดับ ในช่วงพีเอช 2.5 ถึง 6.5 ผลการทดลองพบว่า ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดไอออนของคอปเปอร์และตะกั่วได้พร้อมกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะดูดซับตะกั่วได้มากกว่า และจากการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับและกรองในระบบการบำบัดแบบต่อเนื่องเพื่อกำจัดโลหะทั้งสองนี้ไปพร้อมๆ กันได้

Lai และ Chen (2001) ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะหนักของคอปเปอร์และตะกั่วรวมทั้งกรดฮิวมิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติ โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่าสามารถกำจัดไอออนของทั้งคอปเปอร์และตะกั่วได้พร้อมกันภายใต้สภาวะที่มีการแข่งขันกัน โดยสามารถดูดจับคอปเปอร์และตะกั่วได้ 0.259 mg Cu/g sand และ 1.211 mg Pb/g sand ตามลำดับ ซึ่งการมีกรดฮิวมิกจะทำให้การดูดจับไอออนของโลหะหนักทั้งสองได้ดีขึ้น

Katsoyiannis และ Zouboulis (2002) ได้ประยุกต์ใช้โพลีเมอร์ประเภทโพลีสไตรีน และ poly HIPE มาเป็นตัวกลางในการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าทั้งสองสามารถกำจัดอาร์ซีนิกออกจากน้ำเสียได้ดี โดย poly HIPE สามารถกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำเสียได้ดีกว่าโพลีสไตรีน โดยประสิทธิภาพที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กไฮดรอกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวกลาง ซึ่งหากมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และการที่ตัวกลางมีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) อย่าง polyHIPE นี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์ซีนิกดีขึ้นเพราะสามารถยึดจับกับเหล็กไฮดรอกไซด์ได้มากขึ้น

Zeng (2003) ศึกษาวิธีการเตรียมซิลิกาที่ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (silica – containing iron (III) oxide) โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและเกลือของเหล็ก (iron (III) salt) เป็นสารตั้งต้นให้เกิดการฟอร์มตัวของ hydrous ferric oxide (FeOOH) sol และ silica sol ไปพร้อมๆ กันเกิดเป็น Fe – Si complex เพื่อใช้ดูดซับอาร์ซีนิก ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคือใช้อัตราส่วน Si/Fe เท่ากับ 0.33 M ซึ่งมีพื้นที่ผิว $186 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยระยะเวลาในการก่อดัวช่วง 1 ถึง 7 วัน ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับอาร์ซีนิก อุณหภูมิในการทำให้แห้งตั้งแต่ $20^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$ ไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับอาร์ซีนิก แต่มีผลต่อความแข็งแรงของตัวดูดซับ (adsorbent strength) ซึ่งหากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 250°C เหล็กออกไซด์อาจก่อตัวเป็น Fe_2O_3 (hematite) และพีเอชสุดท้ายของระหว่างการก่อดัวของ Fe-Si complex slurry ควรอยู่ในช่วง 6 – 8

Xu และ Axe (2004) ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของซิลิกาที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และทำการดูดซับโลหะหนักของนิเกิล เพื่อพิจารณาถึงการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในดินและตะกอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากการดูดซับที่สำคัญเกิดจากพื้นที่ผิวของเหล็กออกไซด์และซิลิกาซึ่งมีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาพบว่ามีปริมาณเหล็กที่เคลือบอยู่บนผิวของซิลิกาอยู่ในช่วง $0.59 - 21.36 \text{ mgFe/g solid}$ โดยปัจจัยสำคัญของปริมาณเหล็กที่พบขึ้นอยู่กับขนาดของซิลิกา โดยปริมาณเหล็กจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยจาก 0.85 เป็น 9.6 mgFe/g solid เมื่อขนาดของซิลิกาลดลงจาก 1.5 เป็น 0.2 mm และปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวของซิลิกาเป็นพันธะทางเคมี โดยซิลิกาเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดนิเกิลได้ดีกว่าซิลิกาที่ไม่ได้เคลือบสูงมาก

พนิจิตร รัตนสิน (2539) ศึกษาการกำจัดสังกะสีและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและนิเกิลได้ดีที่สุดที่ความ

เข้มข้นเท่ากับ 50 mg/L พีเอช 6 โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและนิกเกิลเท่ากับ 60.66 % และ 68.27% ตามลำดับ

สำหรับซีลิกาเจลที่นำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับโลหะหนักส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการสังเคราะห์หรือการดัดแปลงขึ้นมาใหม่ ตัวอย่างเช่น Chiron และคณะ ในปี 2003 ได้ศึกษาการดูดซับ Cu (II) และ Pb (II) บนซีลิกาเจลที่ถูกดัดแปลงด้วย *N*- [3 – (trimethoxysilyl) propyl] – ethylenediamine และ Bois และคณะ ในปี 2003 ศึกษาความสามารถของหมู่ฟังก์ชันประเภทต่างๆ บนซีลิกาเจลที่ถูกดัดแปลงเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เป็นต้น แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่ใช้ซีลิกาเจลที่ใช้แล้วมาเป็นตัวกลางเพื่อเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ไปใช้กำจัดโลหะหนักโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวิธีการเคลือบเหล็กออกไซด์ลงบนผิวของซีลิกาเจล โดยเฉพาะซีลิกาเจลที่ใช้แล้วเพื่อนำมาใช้กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (ซิลิกาเจล 60 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.063-0.2 มิลลิเมตร)
2. ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์
3. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์
4. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะ
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซิลิกาเจลที่มาจากต่างห้องปฏิบัติการเมื่อเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ด้วยภาวะที่เหมาะสม
6. นำไปทดสอบกับน้ำเสียจริง

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1. เครื่องชั่งไฟฟ้าชนิด 4 ตำแหน่ง | ยี่ห้อ : รุ่น
Mettler : AT200 |
| 2. เครื่องเขย่า (Shaker) | Kika-Werk : HS500 |
| 3. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) | Hanna : pH 211 |
| 4. เครื่องคนแม่เหล็ก | Gem : MS 101 |
| 5. เครื่อง Transferpette (Micropipet) | Brand : 100 – 1000 μ L |
| 6. เครื่อง X – Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) | Philips : PW 2400 |
| 7. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) | Jeol : JSM 6400 |
| 8. เครื่อง Surface Area Analyzer (SAA) | Thermo Finnigan : Sorptomatic 1990 |
| 9. เครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS) | Perkin Elmer : AAnalyst 100 |
| 10. เครื่อง Orbital Mixer Incubator | Ratek |

เครื่องมือและอุปกรณ์ (ต่อ)

11. ตู้อบ
12. เต้าเผา
13. แท่งคนแม่เหล็ก
14. ขวดพลาสติก
15. เครื่องแก้ว
16. กระดาษกรอง

ยี่ห้อ : รุ่น

Memmert

Carbolite

3.2.2. สารเคมี

1. Nitric Acid 65% (Merck)
2. Sodium hydroxide (Merck)
3. Ferric nitrate nonahydrate (Carlo Erba)
4. Copper nitrate 1000 mg/L (BDH)
5. Lead nitrate 1000 mg/L (BDH)
6. Iron nitrate 1001 ± 2 mg/L (Merck)
7. Copper sulfate (Merck)
8. Lead nitrate (M&B)
9. Silica gel 60 (SiO_2) ขนาด 0.063-0.2 mm (Merck)

คุณสมบัติ

Analytical Reagent Grade

Analytical Reagent Grade

Analytical Reagent Grade

Standard Solution

Standard Solution

Standard Solution

Analytical Reagent Grade

Analytical Reagent Grade

Analytical Reagent Grade

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

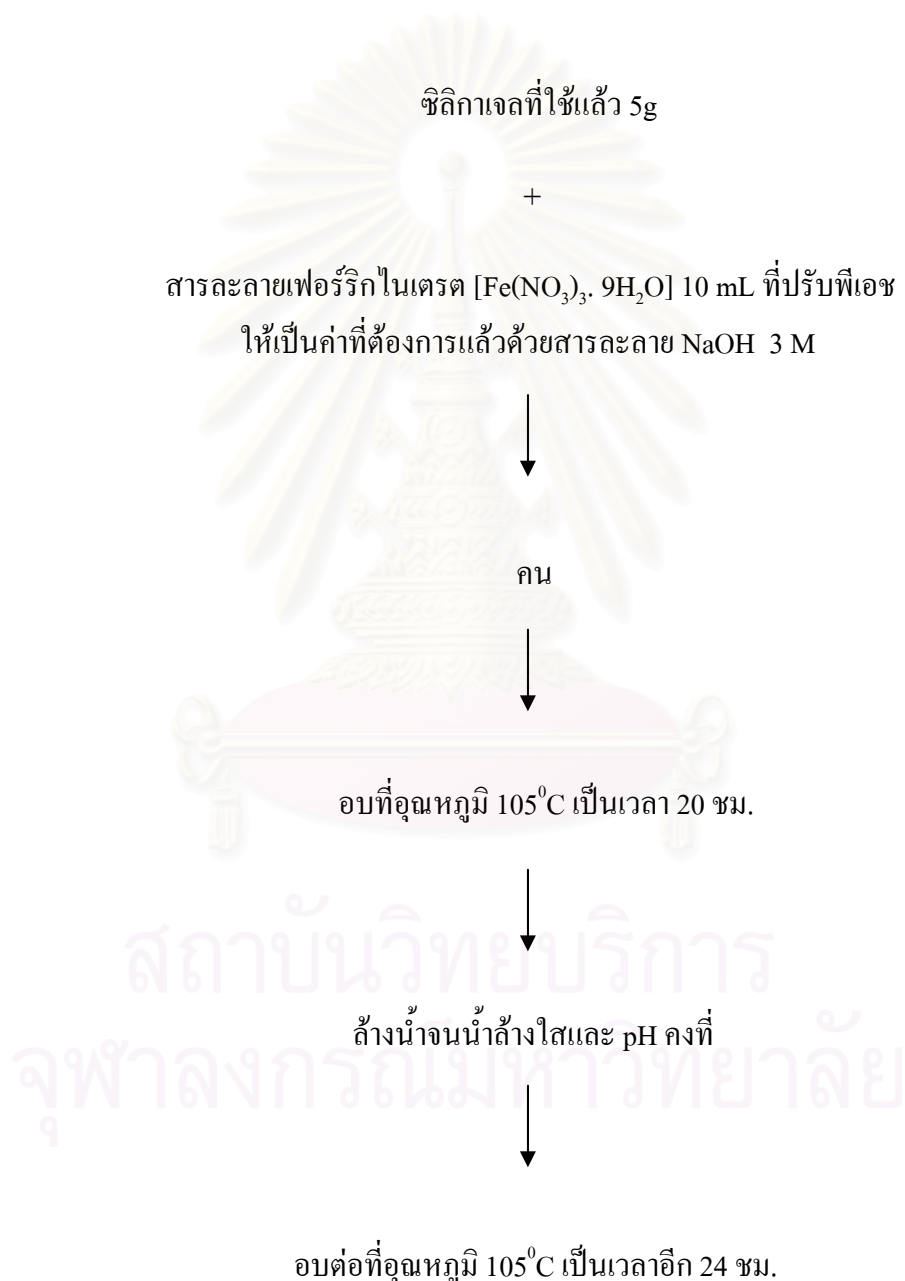
3.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ จะศึกษาโดยใช้วิธีการเคลือบ 2 แบบ ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมและปัจจัยที่ใช้ศึกษา ดังนี้

3.3.1.1 การเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method)

(Edwards และ Benjamin, 1989 และ Szecsody และคณะ, 1994)

การเคลือบแบบที่ 1 เป็นการเคลือบเหล็กออกไซด์บนซิลิกาเจล โดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูง ก่อนนำไปเคลือบบนซิลิกาเจล โดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำ ซึ่งมีขั้นตอนในการเคลือบ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1

(Modified Adsorption Method)

จากการเคลือบแบบที่ 1 ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาในการคน พีเอชของสารละลายเหล็ก อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนทำการเคลือบ รวมทั้งปริมาณเหล็ก โดยมีตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษา ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษาในการเคลือบแบบที่ 1

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา
ระยะเวลาในการคน	5, 60, 120 นาที
pH ของสารละลายเหล็ก	4.1 – 12.3
อุณหภูมิและเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ	100 °C (24 ชม.), 500°C (3 ชม.)
ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก	0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16, 6.93 %w/v

1. ระยะเวลาในการคน

ซิงเฟอร์ริกไนเตรต 2 g ละลายน้ำ 10 mL หยดสารละลาย NaOH 3 M ลงไป จนสารละลายเหล็กมีพีเอชประมาณ 11.5 – 11.75 จากนั้นเติมซิลิกาเจลที่ใช้แล้วลงไป 5 g ทำ 3 ชุด ชุดแรกคน 5 นาที ส่วนชุดที่ 2 กับ 3 คน 60 และ 120 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างน้ำจืดล้างไล่และพีเอชคงที่ แล้วนำเข้าไปอบต่อที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชม. และทำการเคลือบแบบเดียวกันกับซิลิกาเจลใหม่เพื่อเปรียบเทียบ

2. พีเอชของสารละลายเหล็ก

เตรียมสารละลายเหล็ก โดยซิงเฟอร์ริกไนเตรต 1g ละลายน้ำ 10 mL ค่อยๆ หยดสารละลาย NaOH 3 M ลงไป เพื่อปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 4.1 – 12.3 จากนั้นเติมซิลิกาเจลที่ใช้แล้วลงไป 5 g คน 60 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างน้ำจืดล้างไล่และพีเอชคงที่ แล้วนำเข้าไปอบต่อที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาอีก 24 ชม.

3. อุณหภูมิและเวลาในการอบซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ

แบ่งซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วออกเป็นสองส่วน เพื่อนำมาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และอีกส่วนนำไปอบที่ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นตัดซัลฟิดาเจลที่อบแล้วที่อุณหภูมิทั้งสองมาอย่างละ 5 g ใส่ลงในสารละลายเหล็ก 10 mL ที่มีเฟอร์ริกไนเตรดละลายอยู่ 1g ปรับให้มีพีเอชประมาณ 12.0 ± 0.3 คน 60 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างน้ำจืดล้างไล่และพีเอชคงที่ แล้วค่อยนำเข้าไปอบต่ออีกครั้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชม. เปรียบเทียบกับซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วที่ไม่ได้อบก่อนนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ และที่ผ่านการอบแต่ไม่ได้เคลือบด้วย

4. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก

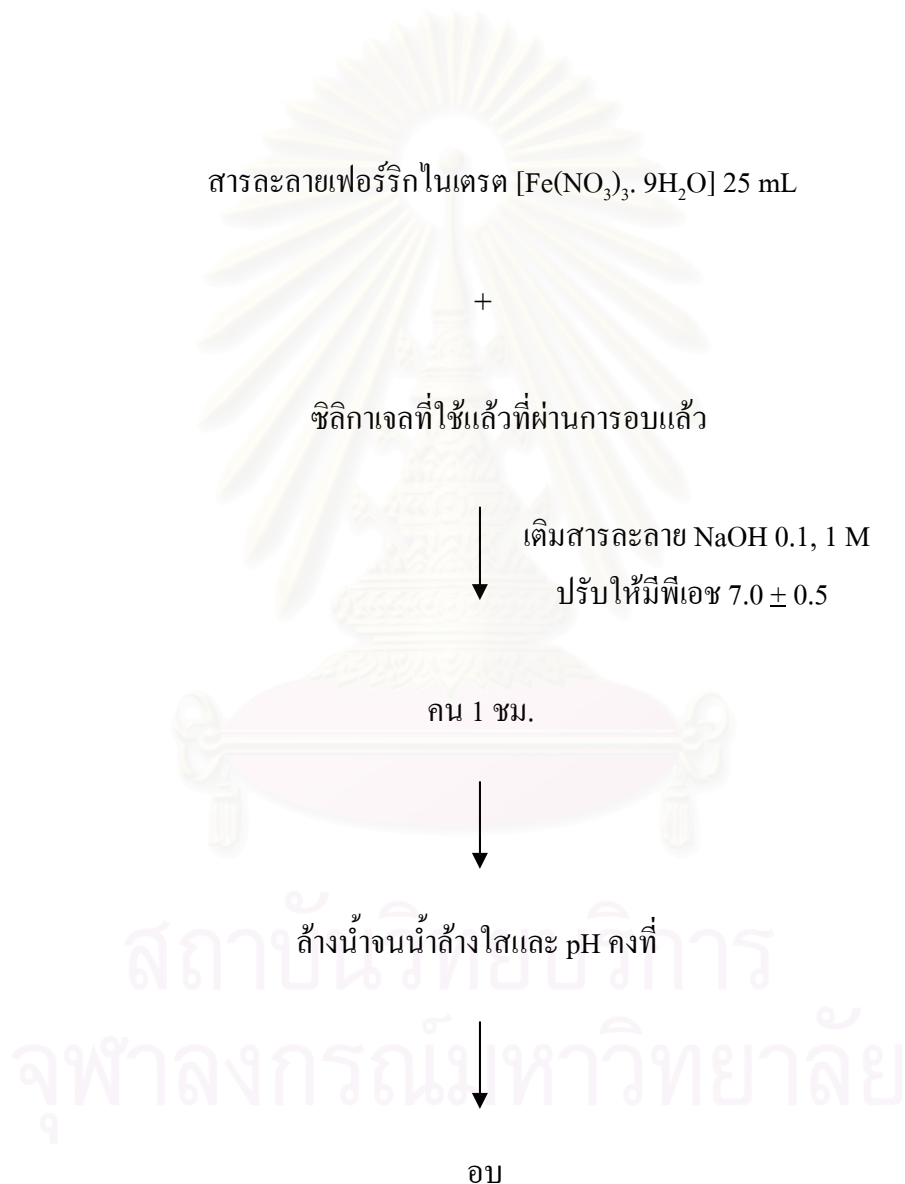
ซังซัลฟิดาเจลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. มา 5 g ใส่ลงในสารละลายเหล็กที่เตรียมจากเฟอร์ริกไนเตรด 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 5 g ละลายน้ำ 10 mL ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16 และ 6.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลาย NaOH 3 M ลงไปจนสารละลายเหล็กมีพีเอชประมาณ 12.0 ± 0.3 คนต่ออีก 60 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 20 ชม. แล้วนำออกมาล้างน้ำจืดล้างไล่และพีเอชคงที่ แล้วค่อยนำเข้าไปอบต่อที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชม.

นำซัลฟิดาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้แต่ละภาวะ ไปเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้ทองแดงเป็นตัวแทนของโลหะหนักที่จะศึกษา โดยเปิดสารละลายทองแดงความเข้มข้น 40 mg/L ปริมาตร 50 mL ใส่ผสมกับซัลฟิดาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซังเตรียมไว้ 0.25 g แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบประมาณ 160 รอบต่อนาที นาน 30 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง จากนั้นกรองแยกซัลฟิดาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS

3.3.1.2 การเคลือบแบบที่ 2 (Modified Precipitation Method)

(Meng และ Letterman, 1993 และ Schluter และคณะ, 1994)

การเคลือบแบบที่ 2 เป็นการเคลือบเหล็กออกไซด์บนซีลิกาเจล โดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนไปพร้อมๆ กับเคลือบอยู่บนผิวของซีลิกาเจลที่พีเอชเป็นกลาง โดยใช้ อุณหภูมิในการเคลือบสูง ซึ่งมีขั้นตอนในการเคลือบ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 (Modified Precipitation Method)

จากการเคลือบแบบที่ 2 ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลา ในการอบซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ อุณหภูมิในการเคลือบ ปริมาณเหล็ก ระยะเวลาในการ เก็บซัลฟิดาเจลที่อบแล้วก่อนนำมาเคลือบ รวมทั้งระยะเวลาในการเก็บซัลฟิดาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนนำมาทดสอบโลหะหนัก โดยมีตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษา ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษาในการเคลือบแบบที่ 2

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา
อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบ ซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ	100 °C (24 ชม.), 500 °C (3 ชม.)
อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบ	80 °C (10 ชม.) + 550 °C (24 ชม.) 80 °C (10 ชม.) + 550 °C (6 ชม.) 80 °C (10 ชม.) + 650 °C (6 ชม.)
ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก	0.06, 0.14, 0.28, 0.55, 1.11 %w/v
ระยะเวลาในการเก็บซัลฟิดาเจล ที่อบที่ 500 °C 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบ	1, 15, 30, 60, 75 วัน
ระยะเวลาในการเก็บซัลฟิดาเจลเคลือบ เหล็กออกไซด์	1, 15, 30, 60, 75 วัน

อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ

นำซัลฟิดาเจลที่ใช้แล้วมาอบที่ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม. และ 500 °C เป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นชั่งมาอย่างละ 5 g ใส่ในสารละลายเหล็ก 25 mL ที่เตรียมจากเฟอร์ริกไนเตรด 0.25 g ละลาย น้ำ 25 mL แล้วค่อยๆ หยดสารละลาย NaOH 0.1 และ 1 M ลงไปเพื่อปรับให้สารละลายมีพีเอช ประมาณ 7.0 ± 0.5 คน 1 ชม. เทสารละลายที่เหลือทิ้งแล้วล้างน้ำหลายๆ รอบจนน้ำล้างใสและ พีเอชคงที่ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 ชม. แล้วนำเข้าเตาเผาโดยใช้อุณหภูมิที่

550⁰C เป็นเวลา 24 ชม. ทำซ้ำกับซิลิกาเจลที่ใช้แล้วอีก 1 ชุด พร้อมกับนำซิลิกาเจลที่ใช้แล้วในแต่ละชุดที่ผ่านการอบแต่ไม่ทำการเคลื่อนไปดูดซับโลหะเพื่อเปรียบเทียบกับ

2. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อน

ซึ่งซิลิกาเจลที่ใช้แล้วที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500⁰C เป็นเวลา 3 ชม. ตักแบ่งมา 3 ครั้ง ครั้งละ 5 g ใส่ในสารละลายเหล็ก 25 mL ที่เตรียมจากซิงเฟอร์ริกไนเตรต 0.25 g ละลายน้ำ 25 mL แล้วหยดสารละลาย NaOH 0.1 และ 1 M ลงไปเพื่อปรับให้สารละลายมีพีเอชประมาณ 7.0 ± 0.5 คน 1 ชม. จากนั้นเทสารละลายที่เหลือทิ้งแล้วล้างน้ำหลายๆ รอบจนน้ำล้างใสและพีเอชคงที่ แล้วนำซิลิกาเจลในสารละลายเหล็กที่ตักแบ่งได้ในแต่ละครั้งไปเคลื่อนที่อุณหภูมิ 80⁰C เป็นเวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550⁰C เป็นเวลา 24 ชม. และเคลื่อนที่อุณหภูมิ 80⁰C เป็นเวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550⁰C เป็นเวลา 6 ชม. รวมทั้งเคลื่อนที่อุณหภูมิ 80⁰C เป็นเวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 650⁰C อีก 6 ชม.

3. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก

นำซิลิกาเจลที่ใช้แล้วที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500⁰C เป็นเวลา 3 ชม. ชั่งมา 5 g ใส่ในสารละลายเหล็กที่มีเฟอร์ริกไนเตรดละลายอยู่ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 g ในน้ำปริมาตร 25 mL ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.06, 0.14, 0.28, 0.55 และ 1.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นหยดสารละลาย NaOH 0.1 และ 1 M ลงไป จนสารละลายมีพีเอชประมาณ 7.0 ± 0.5 คน 1 ชม. เทสารละลายที่เหลือทิ้งแล้วล้างน้ำหลายๆ รอบจนน้ำล้างใสและพีเอชคงที่ จากนั้นนำไปเคลื่อนที่อุณหภูมิ 80⁰C เป็นเวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550⁰C อีก 6 ชม. ทำการเคลื่อนซ้ำ 3 ครั้ง และทำซ้ำกับซิลิกาเจลที่ใช้แล้วอีก 1 ชุด

4. ระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลที่อบด้วยอุณหภูมิ 500⁰C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลื่อนด้วยเหล็กออกไซด์

ซึ่งซิลิกาเจลที่ใช้แล้วที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500⁰C เป็นเวลา 3 ชม. ที่เก็บไว้ในขวดพลาสติกปิดฝานาน 1, 15, 30, 60 และ 75 วัน ชั่งมาอย่างละ 5 g ใส่ในสารละลายเหล็ก 25 mL ที่มีเฟอร์ริกไนเตรดละลายอยู่ 0.5 g หยดสารละลาย NaOH 0.1 และ 1 M ลงไป จนสารละลายมีพีเอชประมาณ 7.0 ± 0.5 คน 1 ชม. เทสารละลายที่เหลือทิ้งแล้วล้างน้ำหลายๆ รอบจนน้ำล้างใสและพีเอชคงที่ จากนั้นนำไปเคลื่อนที่อุณหภูมิ 80⁰C เป็นเวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550⁰C อีก 6 ชม.

5. ระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนนำไปดูดซับโลหะ

ซึ่งซิลิกาเจลใช้แล้วที่อบด้วยอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชม. มา 50 g ใส่ในสารละลายเหล็กที่มีเฟอร์ริกไนเตรดละลายอยู่ 5 g จากนั้นหยดสารละลาย NaOH 0.1 และ 1 M ลงไปเพื่อปรับให้สารละลายเหล็กมีพีเอชประมาณ 7.0 ± 0.5 คน 1 ชม. เทสารละลายที่เหลือทิ้งและล้างน้ำหลายๆ รอบจนน้ำล้างใสและพีเอชคงที่ แล้วนำไปเคลือบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550 °C อีก 6 ชม. จากนั้นเก็บใส่ขวดพลาสติกปิดฝาให้แน่น แล้วแบ่งออกมาทำการดูดซับโลหะหลังจากเก็บซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ไว้เป็นเวลา 1, 15, 30, 60 และ 75 วัน

นำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้จากแต่ละภาวะ ไปเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้ทองแดงเป็นตัวแทนของโลหะหนักที่จะศึกษา โดยเปิดสารละลายทองแดงความเข้มข้น 40 mg/L ปริมาตร 50 mL ใส่ผสมกับซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.25 g แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบประมาณ 160 รอบต่อนาที นาน 30 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง ส่วนการศึกษาเรื่องระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลที่ผ่านการอบแล้วก่อนนำมาเคลือบและการศึกษาระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นกรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS

3.3.2 ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

นำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 มาศึกษาลักษณะของพื้นผิว องค์ประกอบและปริมาณทางเคมี พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน โดยใช้เครื่องมือและเทคนิค ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

ลักษณะคุณสมบัติ	เครื่องมือ / เทคนิคที่ใช้
ลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
องค์ประกอบและปริมาณทางเคมี	X – Ray Fluorescence (XRF)
พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน	Surface Area Analyzer (SAA)

3.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ 1. ระยะเวลาในการสัมผัส 2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ 3. พีเอชของสารละลายโลหะ 4. ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กขณะใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย และ 5. ผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย โดยผลการทดลองที่ได้จะนำไปคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ และเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดต่อไป

1. ระยะเวลาในการสัมผัส

ชั่งซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มา 0.1 g ปิเปตสารละลายทองแดงความเข้มข้น 40 mg/L ปริมาตร 10 mL ใส่ลงไป แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วประมาณ 160 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที ทำซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง กรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS ทำเช่นเดียวกันนี้กับสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 50 mg/L และใช้ปริมาตร 25 mL แทน

สำหรับละลายทองแดงจะศึกษาที่เวลาดำกว่า 5 นาทีด้วย โดยชั่งซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดเดียวกันใส่ในขวดโพลีเอทิลีน 3 ขวด ขวดละ 0.5 g ปิเปตสารละลายทองแดงความเข้มข้น 40 mg/L ปริมาตร 50 mL ใส่ลงไป นำไปคนด้วยเครื่องคนแม่เหล็กแล้วปิเปตสารละลายออกมาครั้งละ 0.5 mL เมื่อเวลาผ่านไป 0.5, 1, 2, 3 และ 4 นาที และนำสารละลายดังกล่าวไปวัดความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS

2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ

เตรียมสารละลายทองแดงและตะกั่วความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 mg/L โดยการเจือจางจากสารละลายสต็อกความเข้มข้น 1000 mg/L จากนั้นปิเปตสารละลายแต่ละความเข้มข้นมาอย่างละ 25 mL ใส่ในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ชั่งเตรียมไว้ 0.25 g สำหรับทองแดงและ 0.1 g สำหรับตะกั่ว ทำซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วประมาณ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที กรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS

3. พิเศษของสารละลายโลหะ

เตรียมสารละลายทองแดงและตะกั่วความเข้มข้น 40 mg/L และ 50 mg/L ตามลำดับ เติม 1M NaOH และ 1M HNO₃ ลงไปเพื่อปรับพีเอชของสารละลายให้ได้ประมาณ 3, 5, 5.5, 6, 7 และ 8 จากนั้นบีบเปิดสารละลายออกมา 25 mL ใส่ลงในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.25 g สำหรับทองแดงและ 0.1 g สำหรับตะกั่ว แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วประมาณ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที กรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS ทำซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง

4. ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับขณะใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

นำสารละลายทองแดงและตะกั่วที่พีเอชประมาณ 3, 5, 5.5, 6, 7 และ 8 จากการทดลองเรื่องพีเอชของสารละลายโลหะข้างต้นไปวัดหาปริมาณเหล็กที่ถูกระงับออกมาด้วย FAAS หลังจากทำการดูดซับทองแดงและตะกั่วเสร็จแล้ว

5. ผลของแคทไอออนและแอนไอออน

เตรียมสารละลายทองแดงความเข้มข้น 40 mg/L และสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 50 mg/L ที่มีเกลือ NaCl ละลายอยู่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.2 M ตามลำดับ ซึ่งเตรียมโดยการเจือจางจากสต็อกของสารละลายโลหะความเข้มข้น 1000 mg/L รวมกับสต็อกของเกลือ NaCl ความเข้มข้น 2 M แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 mL สำหรับสารละลายทองแดงและ 100 mL สำหรับสารละลายตะกั่ว จากนั้นบีบเปิดสารละลายทองแดงออกมาอย่างละ 10 mL และสารละลายตะกั่วออกมาอย่างละ 25 mL ใส่ในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.1 g แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วประมาณ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที กรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS ทำซ้ำ 3 ครั้ง

3.3.4 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายตะกั่วและทองแดงด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการเคลือบแบบที่ 2 โดยใช้ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดเดียวกันกับที่นำมาใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้ระยะเวลาในการ

สัมผัสที่ 30 นาที ใช้สารละลายตะกั่วและทองแดงความเข้มข้นของเท่ากับ 50 ppm และ 40 ppm ตามลำดับ โดยมีค่าพีเอชประมาณ 5.5 ซึ่งมีวิธีการทดลอง ดังนี้

ซึ่งซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มา 0.05 – 0.5 g สำหรับการศึกษาคัดซับของสารละลาย ตะกั่วและทองแดง จากนั้นเปิดสารละลายโลหะแต่ละประเภทปริมาตร 25 mL ใส่งไป แล้วนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าแบบปิดที่อุณหภูมิห้องที่ 29 องศาเซลเซียส (เขย่าแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา 360 องศา) ที่ความเร็วรอบประมาณ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วกรองแยกซิลิกาเจล และนำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS

3.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซิลิกาเจลที่มาจากต่าง ห้องปฏิบัติการ

รวบรวมซิลิกาเจลที่ใช้แล้วทั้งหมด 6 ชุด มาอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมา เคลือบด้วยวิธีแบบที่ 2 โดยใช้ปริมาณเฟอร์ริกไนเตรด 0.5 g และใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ 80°C นาน 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิที่ 550°C อีก 6 ชม. และเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะ หนักกับซิลิกาเจลชุดเดียวกันที่ผ่านการอบแต่ไม่ได้ทำการเคลือบ ทำซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง โดยมีขั้นตอน ดังรูปที่ 3.3

การคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนัก พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ในการ กำจัดโลหะหนัก (% Removal, R) ดังสมการที่ (3.1) และความสามารถของตัวดูดซับในการจับ กับโลหะ (adsorption capacity, Q) ดังสมการที่ (3.2)

$$R = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$Q = \frac{(C_0 - C_e) \times v}{m} \dots\dots\dots(3.2)$$

R = เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนัก

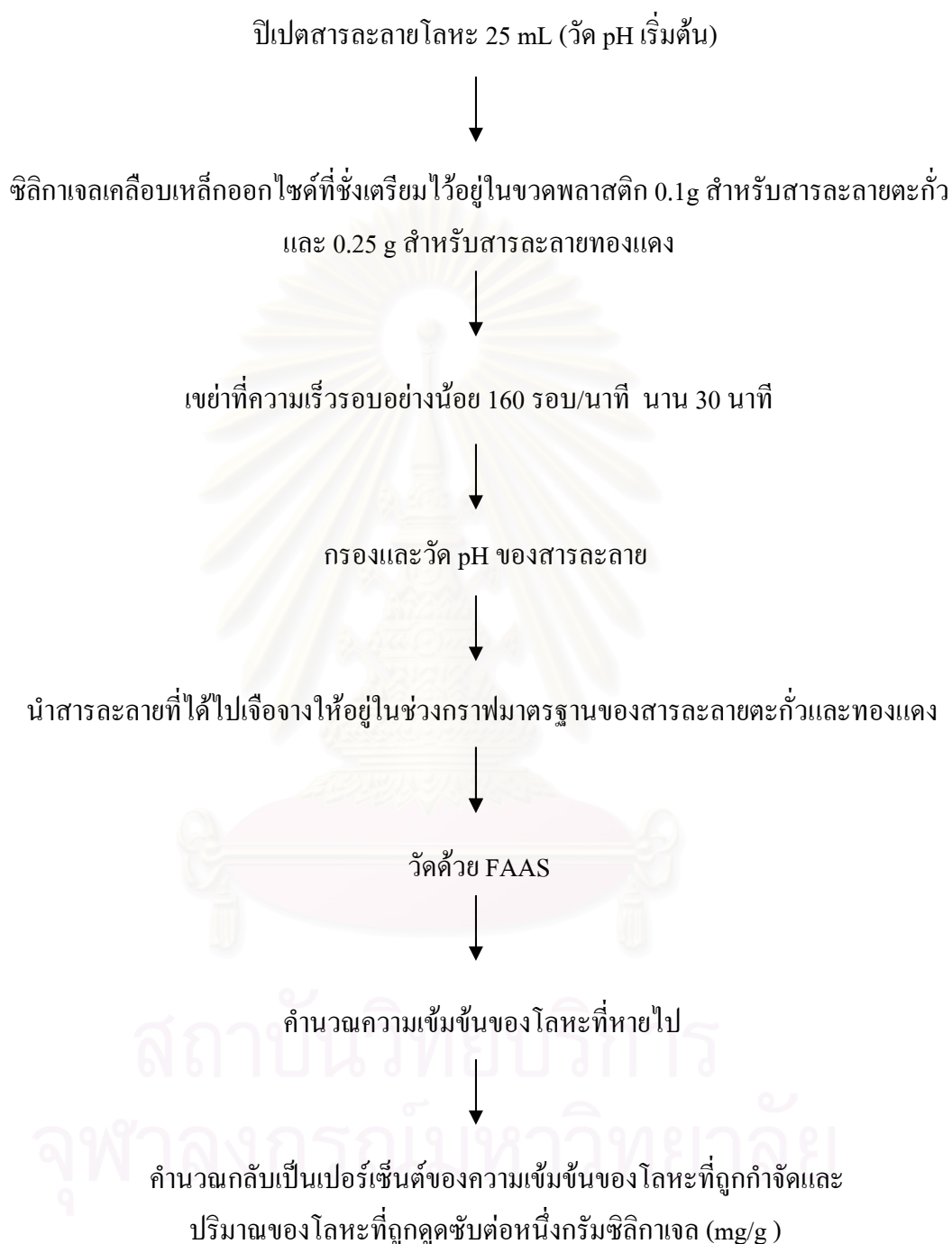
Q = ความสามารถในการจับโลหะ (mg/g)

C₀ = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ (mg/L)

v = ปริมาตรของสารละลาย (L)

m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถของซีลีกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ในการดูดซับโลหะหนัก

3.3.6 ทดสอบกับน้ำเสียจริง

นำซัลโฟนาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชนิดที่ 6 ที่ผ่านการเคลือบแบบที่ 2 ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับซัลโฟนาเจลชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทำการเคลือบมาดูดซับตะกั่ว และทองแดงจากน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาลักษณะภายนอกของน้ำเสียก่อน ได้แก่ กลิ่น สี และความขุ่น จากนั้นนำไปวัดความเป็นกรดเป็นด่าง แล้วจึงเติม NaOH 0.1 M ลงไปเพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีพีเอชประมาณ 5.5 ก่อนนำไปวัดหาปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นที่มีด้วยเครื่อง FAAS จากนั้นเปิดน้ำเสียมา 25 mL ใส่ในซัลโฟนาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ชั่งเตรียมไว้ 0.1 g สำหรับกำจัดตะกั่ว และ 0.25 g สำหรับกำจัดทองแดง (อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเดียวกับการศึกษาภาวะของสารละลายโลหะที่เหมาะสม) กรองแยกซัลโฟนาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดโลหะหนักที่ได้ เปรียบเทียบกับความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้ทำการทดลองจากข้างต้น โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการศึกษาตัวแปรในการเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method) และ ส่วนของการศึกษาตัวแปรในการเคลือบแบบที่ 2 (Modified Precipitation Method) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้ในแต่ละภาวะจากความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งในการทดลองส่วนนี้ได้ใช้ทองแดงเป็นตัวแทนของโลหะหนักที่จะศึกษา โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1.1 การเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method)

ในการเคลือบแบบที่ 1 ได้มีการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูงก่อนนำไปเคลือบบนซิลิกาเจล และใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำ โดยทำการศึกษา 1. ระยะเวลาในการคน 2. พีเอชของสารละลายเหล็ก 3. อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนทำการเคลือบ และ 4. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ระยะเวลาในการคน

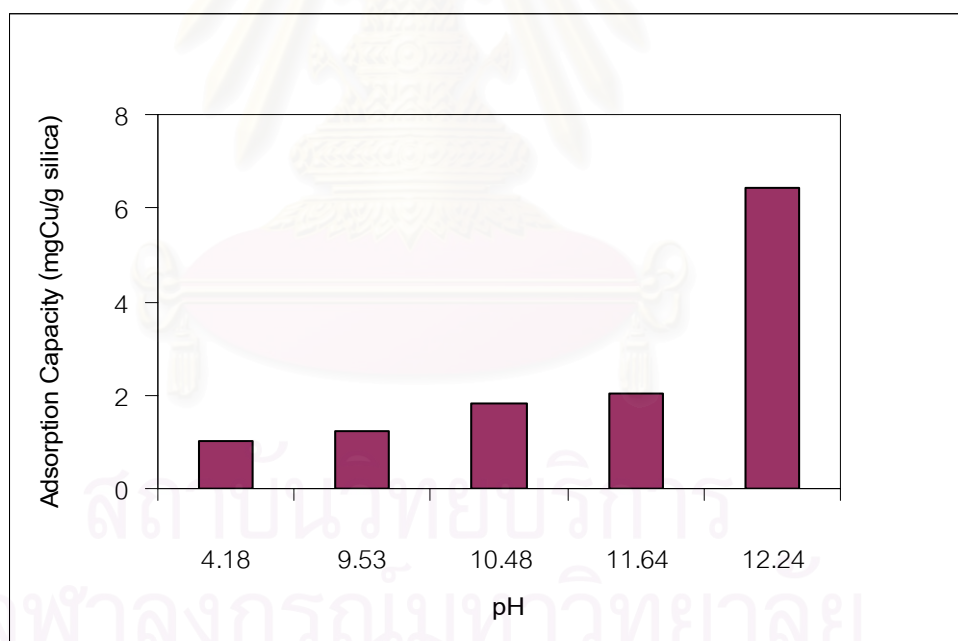
ผลการศึกษาระยะเวลาในการคนของผสมระหว่างสารละลายเหล็กที่ปรับพีเอชแล้วกับซิลิกาเจล ที่เวลา 5, 60 และ 120 นาที เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในตารางที่ 4.1 พบว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลใหม่ที่เคลือบเหล็กออกไซด์ลดลงจาก 3.78 mg/g เหลือ 3.04 mg/g เมื่อใช้ระยะเวลาในการคนเพิ่มขึ้นจาก 5 นาทีเป็น 120 นาที ในขณะที่การเคลือบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วจะทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 2.23 mg/g เป็น 3.15 mg/g เมื่อเพิ่มเวลาในการคนจาก 5 นาที เป็น 60 นาที และค่อยลดลงเหลือ 2.70 mg/g เมื่อใช้เวลานานขึ้นเป็น 120 นาทีหรือ 2 ชั่วโมง ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการคนที่ 60 นาทีในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ระยะเวลาในการคนที่ 5, 60 และ 120 นาที (pH 11.5 – 11.75)

ระยะเวลาในการคน (นาที)	Adsorption Capacity (mgCu/g Si)	
	เคลือบซิลิกาเจลใหม่	เคลือบซิลิกาเจลใช้แล้ว
5	3.78	2.23
60	3.56	3.15
120	3.04	2.70

2. พีเอชของสารละลายเหล็ก

ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายเหล็กที่ใช้ในการเคลือบในช่วง 4.18 – 12.24 พบว่า เมื่อพีเอชสูงขึ้นความสามารถในการกำจัดทองแดงของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้จะเพิ่มขึ้นจาก 1.00 ถึง 6.43 mg/g ดังแสดงในรูปที่ 4.1



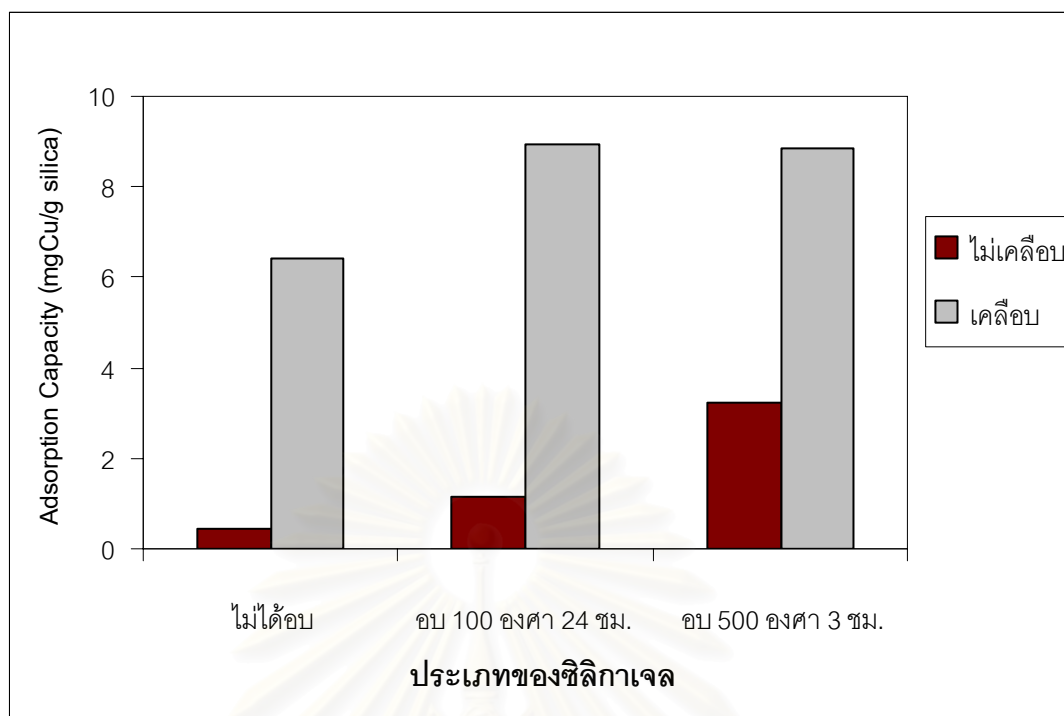
รูปที่ 4.1 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชของสารละลายเหล็กเท่ากับ 4.18 ถึง 12.24

โดยผลการทดลองในการดูดซับพบว่า พีเอชของสารละลายทองแดงจะอยู่ในช่วง 5.5 ± 0.45 ทั้งก่อนและหลังเติมตัวดูดซับ ซึ่งยังเป็นช่วงพีเอชที่ไม่ทำให้ทองแดงตกตะกอน

ดังนั้นจะเห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นที่พีเอชต่างๆ ไม่มีผลต่อพีเอชของสารละลายโลหะและความสามารถในการกำจัดทองแดงที่ได้ โดยผลการทดลองยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Lo และคณะ ในปี 1997 ที่พบว่าทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอช 12 ก่อนนำไปเคลือบบนตัวกลางที่เป็นทรายจะสามารถกำจัดโลหะได้ดีกว่าการเคลือบด้วยสารละลายเหล็กที่มีพีเอชเท่ากับ 6 ได้ถึง 10 เท่า และพบว่าเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นผลึก (crystalline) ที่เรียกว่าเกอร์ไทต์ (FeOOH) ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้การศึกษาตัวแปรต่อไป จึงทำการเคลือบซิลิกาเจลด้วยการปรับพีเอชของสารละลายเหล็กให้เป็น 12 ก่อนนำไปเคลือบบนซิลิกาเจลต่อไป

3. อุณหภูมิและเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ

ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วส่วนใหญ่จะมีสารอินทรีย์ติดอยู่ ทำให้ซิลิกาเจลมีพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับสารได้ลดน้อยลง แต่สารอินทรีย์บางชนิด เช่น ตัวทำละลายอินทรีย์สามารถที่จะระเหยได้เมื่อได้รับความร้อนหรือเมื่อตั้งทิ้งไว้นานๆ ดังนั้นการนำซิลิกาเจลที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่จึงจำเป็นต้องศึกษาเรื่องอุณหภูมิและเวลาในการอบซิลิกาเจลก่อนนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลใช้แล้วที่ไม่ได้อบ กับซิลิกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนและหลังนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าการอบซิลิกาเจลจะส่งผลทำให้ความสามารถในการจับกับโลหะทองแดงเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบเมื่ออบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. จะจับกับทองแดงได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และซิลิกาเจลที่ไม่ได้อบ ตามลำดับ ในขณะที่ซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์นั้นพบว่า การอบซิลิกาเจลก่อนนำมาเคลือบจะทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ผ่านการอบ และการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และอบที่ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน



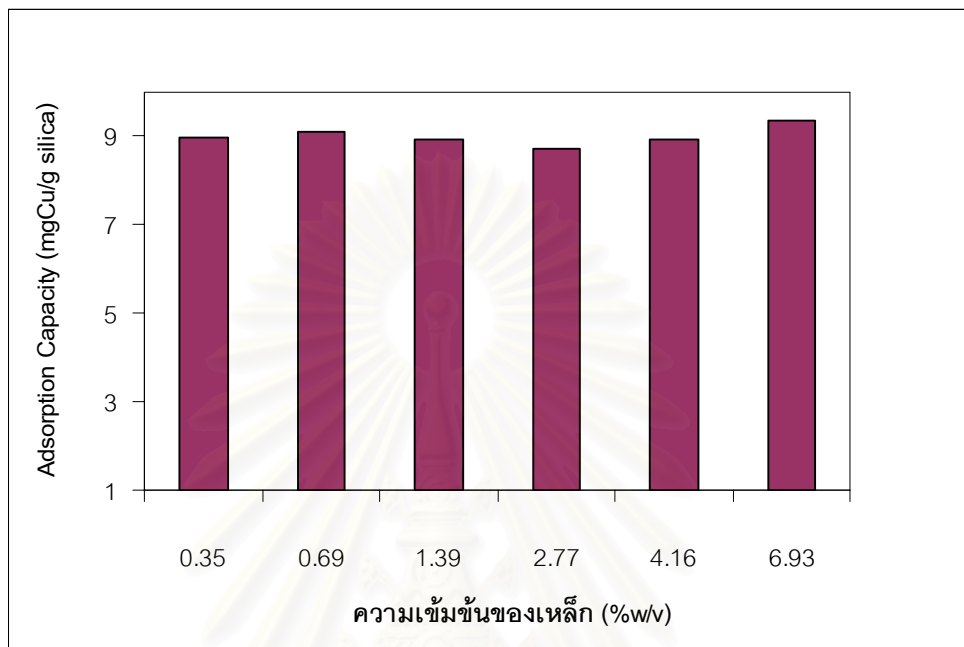
รูปที่ 4.2 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่ไม่ได้อบกับที่อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม. และอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบด้วยเหล็ก ออกไซด์เปรียบเทียบกับซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบเหล็กออกไซด์

ดังนั้นจึงเลือกใช้ซิลิกาเจลที่อบมาแล้วที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนนำมาศึกษาในตัวแปรต่อไป

4. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก

ในการศึกษาผลของปริมาณเหล็กในรูปของเฟอร์ริกไนเตรด ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ได้มีการใช้ปริมาณเหล็กในช่วง 0.25 – 5 g ละลายในน้ำ 10 mL หรือคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16, 6.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยปรับพีเอชของสารละลายเหล็กให้อยู่ในช่วง 12.0 ± 0.3 จากผลการทดลองพบว่า ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมจากเฟอร์ริกไนเตรด 0.25 g ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็ก 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการกำจัดทองแดงได้ไม่แตกต่างจากตัวดูดซับที่เตรียมจากสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ดังรูปที่ 4.3 และจากงานวิจัยของ Lo และคณะในปี 1997 พบว่าการเคลือบทรายด้วยเหล็กออกไซด์เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.003 ถึง 0.03 M ไม่ทำให้ความสามารถในการกำจัดทองแดงและแคดเมียมเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด ซึ่งแสดง

ให้เห็นว่าทั้งทรายและซิลิกาเจลสามารถเคลือบหรือจับกับเหล็กออกไซด์ได้อย่างจำกัด จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักที่ได้ไม่แตกต่างกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของเหล็กในการเคลือบที่มากเกินไปแล้ว



รูปที่ 4.3 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นของเหล็ก 0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16, 6.93 %w/v และพีเอชของสารละลายเท่ากับ 12.0 ± 0.3

ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับแบบที่ 1 จึงเป็นการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้สารละลายเหล็กเข้มข้น 0.35 %w/v ปริมาตร 10 mL ต่อซิลิกาเจล 5 g และปรับพีเอชของสารละลายเหล็กให้อยู่ในช่วง 12.0 ± 0.3 โดยซิลิกาเจลที่นำมาใช้ควรอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนเสมอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 การเคลือบแบบที่ 2 (Modified Precipitation Method)

ในการเคลือบแบบที่ 2 ได้มีการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชเป็นกลางไปพร้อมๆ กับเคลือบอยู่บนผิวของซิลิกาเจล และใช้อุณหภูมิในการเคลือบสูง โดยทำการศึกษา 1. อุณหภูมิและเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนนำมาเคลือบ 2. อุณหภูมิในการเคลือบ 3. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก 4. ระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลที่ผ่านการอบก่อนนำมาเคลือบและซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แล้ว ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิและเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ

การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการอบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วก่อนเคลือบ ได้ทำการอบซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดทองแดง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในการเคลือบที่ 0.14 %w/v และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงกับซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เมื่ออบที่อุณหภูมิและระยะเวลาเท่ากัน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบซิลิกาเจล 2 ชุด ซึ่งมีผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ที่อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และ 500°C เป็นเวลา 3 ชม.

อุณหภูมิและเวลา ในการอบก่อนเคลือบ	Adsorption Capacity (mg/g)			
	ซิลิกาเจลชุดที่ 1		ซิลิกาเจลชุดที่ 2	
	ไม่เคลือบ	เคลือบ	ไม่เคลือบ	เคลือบ
100°C (24 ชม.)	0.42	1.11	1.16	2.10
500°C (3 ชม.)	0.51	2.27	3.11	3.64

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่า ซิลิกาเจลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. และอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. เมื่อนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะสามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าซิลิกาเจลชุดเดียวกันที่ไม่ได้เคลือบ โดยพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลทั้งที่ยังไม่เคลือบและที่เคลือบทั้ง 2 ชุด จะเพิ่มขึ้น เมื่ออบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดที่ 2

มีความสามารถในการกำจัดทองแดงได้สูงกว่าซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชนิดที่ 1 คือ สามารถกำจัดได้ 3.64 mg/g ในขณะที่ชนิดที่ 1 สามารถกำจัดได้ 2.27 mg/g แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่เคลือบ และซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าซิลิกาเจลชนิดที่ 2 สามารถกำจัดทองแดงได้เพิ่มขึ้นน้อยกว่าซิลิกาเจลชนิดที่ 1 โดยสามารถกำจัดได้ 3.11 mg/g เมื่อไม่มีการเคลือบ และเพิ่มเป็น 3.64 mg/g เมื่อเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ส่วนซิลิกาเจลชนิดที่ 1 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.51 mg/g เป็น 2.27 mg/g ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากซิลิกาเจลทั้งสองชุดมาจากแหล่งต่างกัน ดังนั้นในการทดลองถัดไป ซิลิกาเจลที่จะนำมาศึกษาจึงต้องอบก่อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ต่อไป

2. อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบ

ซิลิกาเจลใช้แล้วที่อบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ถูกนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่ 0.14 %w/v และใช้อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบต่างๆ กัน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่เตรียมได้ ผลการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 จากการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่เตรียมได้ เมื่อใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ 80°C เวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550°C อีก 24 ชม., อบที่ 80°C เวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550°C อีก 6 ชม. และอบที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 650°C อีก 6 ชม. มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเริ่มแรกใช้อุณหภูมิต่ำในการอบเพื่อระเหยน้ำออกไป จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เพื่อให้เหล็กฟอร์มตัวเกิดเป็นเหล็กออกไซด์แล้วเคลือบอยู่บนผิวซิลิกาเจลเหมือนกัน โดยพบว่าอุณหภูมิในการเคลือบที่ 550°C และ 650°C ในระยะเวลาเท่ากันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้ รวมทั้งระยะเวลา 6 ชั่วโมงและ 5 ชั่วโมง ไม่ทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีประสิทธิภาพต่างกัน จากการศึกษาของ Zeng ในปี 2003 พบว่าการเคลือบที่อุณหภูมิสูงกว่า 250°C จะช่วยเพิ่มความเสถียรและความแข็งแรงของออกไซด์ที่เคลือบอยู่ และเกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นหลัก ดังนั้นในการเคลือบแบบที่ 2 นี้เหล็กออกไซด์น่าจะอยู่ในรูปของฮีมาไทต์เช่นกัน จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดทองแดงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ 550°C และ 650°C ดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบต่างๆ

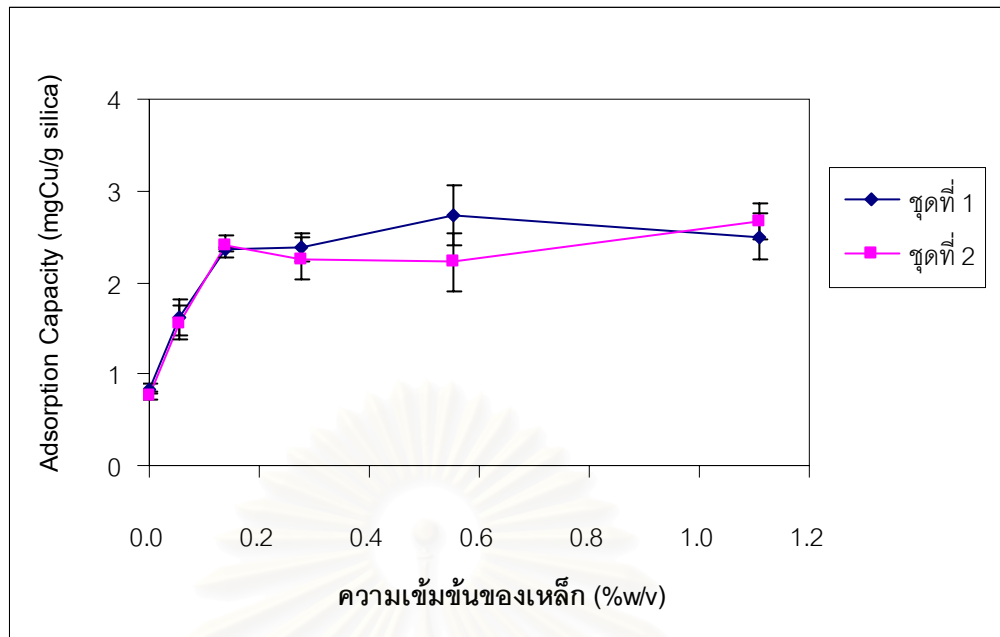
อุณหภูมิและเวลาในการอบก่อนเคลือบ	อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบ	Adsorption Capacity (mg/g)
500 ⁰ C (3 ชม.)	80 ⁰ C (10 ชม.) + 550 ⁰ C (24 ชม.)	2.27
	80 ⁰ C (10 ชม.) + 550 ⁰ C (6 ชม.)	2.38
	80 ⁰ C (10 ชม.) + 650 ⁰ C (6 ชม.)	2.35

ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการอบที่ 80⁰C เวลา 10 ชม. ต่อด้วยอุณหภูมิ 550⁰C อีก 6 ชม. มาใช้ศึกษากับตัวแปรตัวต่อไป

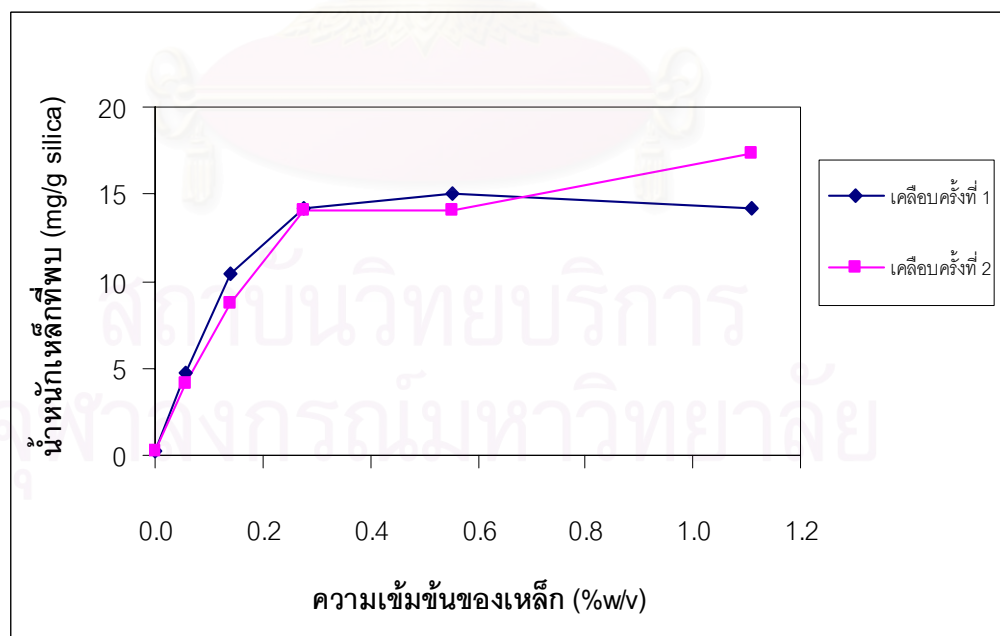
3. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก

ในการศึกษานี้ได้มีการใช้เหล็กในรูปของเฟอร์ริกไนเตรต $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ น้ำหนัก 0.1, 0.25, 0.5, 1 และ 2 g ละลายน้ำ 25 mL ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.06, 0.14, 0.28, 0.55 และ 1.11 %w/v ตามลำดับ ในการเคลือบซลิคาเจล 5 g ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500⁰C เป็นเวลา 3 ชม. และเปรียบเทียบการดูดซับทองแดงกับซลิคาเจลที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแต่ใช้น้ำแทนสารละลายเฟอร์ริกไนเตรต รวมทั้งซลิคาเจลที่อบแล้วแต่ไม่ผ่านขั้นตอนการเคลือบ โดยศึกษาจากซลิคาเจล 2 ชุดและทำการเคลือบซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4

จากการทดลองพบว่า ซลิคาเจลที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแต่ไม่ใช้เฟอร์ริกไนเตรตสามารถจับกับทองแดงได้มากกว่าซลิคาเจลที่อบแต่ไม่ได้เคลือบ คือ สามารถกำจัดได้ 0.51 mg/g สำหรับซลิคาเจลที่ไม่เคลือบ และเพิ่มเป็น 0.84 mg/g สำหรับซลิคาเจลที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแต่ไม่ใส่เฟอร์ริกไนเตรต ส่วนซลิคาเจลชุดที่ 2 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.69 mg/g เป็น 0.77 mg/g ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนของการเคลือบจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถจับกับโลหะให้สูงขึ้น โดยซลิคาเจลทั้งสองชุด เมื่อเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะสามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าซลิคาเจลที่ไม่ได้เคลือบและที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบโดยไม่ใส่เหล็ก โดยความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลที่เคลือบเหล็กออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของเหล็กที่เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อใช้เหล็กที่ความเข้มข้น 0.28 % w/v และแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของเหล็กเป็น 0.55 %w/v และ 1.11 % w/v แต่ความสามารถในการกำจัดทองแดงไม่ได้เพิ่มขึ้นตาม เมื่อหาปริมาณเหล็กจากอนุภาคของซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดที่ 1 ด้วยเครื่อง X – Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจล 2 ชุด ที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแต่ไม่ใส่เฟอร์ริกไนเตรตและที่ใส่เฟอร์ริกไนเตรตที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 0.06, 0.14, 0.28, 0.55, 1.11 %w/v



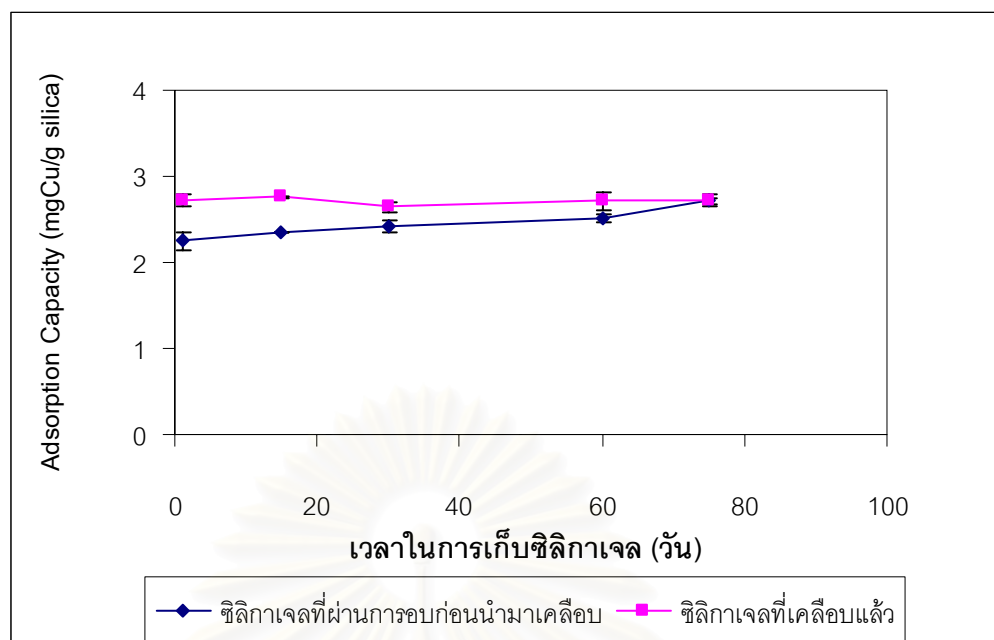
รูปที่ 4.5 น้ำหนักเหล็กที่พบในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กด้วยเครื่อง XRF ของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ จากการเคลือบในแบบที่ 2 ที่ความเข้มข้นของเหล็ก 0.06, 0.14, 0.28, 0.55, 1.11 %w/v หรือคิดเป็นปริมาณเหล็กเริ่มต้น 2.77, 6.93, 13.86, 27.72 และ 55.45 mg/g silica gel ตามลำดับ เทียบกับซิลิกาเจลที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแต่ไม่ใส่เฟอร์ริกไนเตรต พบว่าปริมาณของเหล็กในรูปของ Fe_2O_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อวิเคราะห์จากตัวดูดซับที่เตรียมจากความเข้มข้นของเหล็กสูงขึ้น และเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.28 %w/v เมื่อคำนวณกลับเป็นน้ำหนักของเหล็กที่พบได้เท่ากับ 14.84 mg Fe/g silica gel ดังรูปที่ 4.5 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการจับโลหะที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการที่ตัวดูดซับมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น และความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่เมื่อปริมาณเหล็กบนตัวดูดซับคงที่

ดังนั้นการเคลือบเหล็กออกไซด์บนของเสี่ยซิลิกาเจล ควรใช้ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.28 %w/v เมื่อใช้อัตราส่วนซิลิกาเจลต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 5 g ต่อ 25 mL หรือเท่ากับ 1 : 5

4. ระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลที่ผ่านการอบก่อนนำมาเคลือบและซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แล้ว

ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเมื่อนำมาอบที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชม. ถูกนำไปบรรจุไว้ในขวดพลาสติกที่ปิดฝาแน่นสนิทแล้วเก็บไว้เป็นเวลา 1, 15, 30, 60 และ 75 วัน ก่อนนำออกมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และทดสอบความสามารถในการกำจัดทองแดง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่า ตัวดูดซับที่เตรียมได้มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้มากขึ้นจาก 2.25 mg/g เป็น 2.72 mg/g เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเก็บจาก 1 วันเป็น 75 วัน จากนั้นซิลิกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชม. และเก็บไว้เป็นเวลา 75 วัน จะถูกนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และเก็บไว้ในขวดปิดและเก็บในบริเวณที่แห้งเป็นเวลา 1, 15, 30, 60 และ 75 วัน ก่อนนำออกมาทดสอบความสามารถในการกำจัดทองแดง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการเก็บซิลิกาเจลที่เคลือบแล้วไม่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะ ซึ่งต่างกับซิลิกาเจลที่อบทิ้งไว้ก่อนนำมาเคลือบที่ยังเก็บไว้นานความสามารถในการกำจัดโลหะกลับมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาในการเก็บต่อความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนนำมาเคลือบและซิลิกาเจลที่เคลือบแล้ว

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บต่อความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิลิกาเจลที่อบและเก็บไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนนำมาเคลือบเหล็กออกไซด์ และซิลิกาเจลที่เคลือบเสร็จแล้ว พบว่า ระยะเวลาในการเก็บไม่ทำให้ซิลิกาเจลกำจัดโลหะได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม ซิลิกาเจลที่ผ่านการอบและเคลือบเสร็จแล้วควรบรรจุไว้ในภาชนะปิดที่แห้งเพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับอากาศภายนอก เนื่องจากซิลิกาเจลอาจดูดซับความชื้นและสิ่งเจือปนในอากาศ ซึ่งอาจจะทำให้พื้นที่ผิวของซิลิกาเจลที่จะสัมผัสและเกิดการเคลือบกับเหล็กออกไซด์มีน้อยลงและทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะลดน้อยลงได้

ดังนั้นจากผลการศึกษากว่าที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 คือ ใช้สารละลายเหล็กความเข้มข้น $0.28\% \text{w/v}$ ปริมาตร 25 mL ต่อซิลิกาเจล 5 g ที่อบแล้วที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พิเอชของสารละลายเหล็กอยู่ในช่วง 7.0 ± 0.5 โดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ 80°C เวลา 10 ชั่วโมง และอบต่อที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 6 ชั่วโมง

4.2 ผลการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

ซิลิกาเจลใช้แล้วที่นำมาศึกษาในครั้งนี้เป็นซิลิกาเจลที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.063 – 0.2 มิลลิเมตรมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 โดยซิลิกาเจลใช้แล้วที่นำมาศึกษาเป็นซิลิกาเจลที่มีสีและกลิ่นของสารเจือปน แต่เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. หรืออบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. แล้ว สีของซิลิกาเจลจะขาวขึ้นและกลิ่นจางหายไป และเมื่อนำไปผ่านขั้นตอนการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าสีของซิลิกาเจลหลังจากเคลือบจะกลายเป็นสีแดงอิฐ

ได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและคุณสมบัติของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการใช้ปริมาณเฟอร์ริกไนเตรต 0.5 g ในการเคลือบซิลิกาเจลแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นปริมาณเหล็กที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับทั้งสองวิธี เพื่อใช้ในวิเคราะห์และเปรียบเทียบต่อไป

โดยในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ มีดังต่อไปนี้ พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน และปริมาณเหล็ก โดยเปรียบเทียบกับซิลิกาเจลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. และยังไม่เคลือบ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน และปริมาณเหล็ก ของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบ และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ประเภทของซิลิกา เจล	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ขนาดรูพรุน (A°)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ปริมาณเหล็ก (mgFe/g) ^a
ซิลิกาเจลที่ผ่านการอบ แต่ไม่ได้เคลือบ (blank)	353.54	36 – 48	0.56	0.20
ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1	112.88	146 – 192	0.47	16.50
ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2	272.20	36 – 48	0.50	14.17

^a วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRF

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.4 พบว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลหลังจากเคลือบเหล็กออกไซด์ลดลงจากเดิมก่อนเคลือบทั้งแบบที่ 1 และแบบที่ 2 อาจเนื่องมาจากการมีเหล็กออกไซด์ที่เพิ่มเข้ามา โดยพื้นที่ผิวของเหล็กออกไซด์อาจมีน้อยกว่าพื้นที่ผิวเดิมของซิลิกาเจลที่

มีอยู่ ประกอบกับเหล็กออกไซด์อาจจะเข้าไปแทรกในรูพรุนของซิลิกาเจล ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลหลังจากเคลือบเหล็กออกไซด์ลดลงจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลในการเคลือบในแบบที่ 1 น้อยกว่าแบบที่ 2 ในขณะที่ขนาดรูพรุนในการเคลือบแบบที่ 2 ยังอยู่ในช่วงเดิม คือ $36 - 48^{\circ}\text{A}$ และขนาดรูพรุนในการเคลือบแบบที่ 1 ที่ใหญ่ขึ้นคือ $146 - 192^{\circ}\text{A}$ การที่ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่ได้จากการเคลือบแบบที่ 2 มีขนาดเล็กกว่าแบบที่ 1 ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับแบบที่ 2 สูงกว่าตัวดูดซับที่ผ่านการเคลือบแบบที่ 1 นอกจากนี้ขนาดรูพรุนที่ต่างกันอาจเนื่องมาจากรูปแบบในการก่อตัวเป็นเหล็กออกไซด์และลักษณะในการเคลือบบนพื้นผิวของซิลิกาเจลมีความแตกต่างกัน เพราะภาวะในการก่อตัวที่ต่างกัน โดยซิลิกาเจลในเคลือบแบบที่ 1 เป็นการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูง คือ พีเอช 12.0 ± 0.3 และใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำที่ 105°C (อุณหภูมิต่ำกว่า 150°C) ซึ่งจะชักนำให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของเฟอร์ไรต์ (FeOOH) ในขณะที่ซิลิกาเจลเคลือบแบบที่ 2 เป็นการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชเป็นกลาง คือ พีเอช 7.0 ± 0.5 และใช้อุณหภูมิในการเคลือบสูงที่ 550°C (อุณหภูมิสูงกว่า 300°C) จะชักนำให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) (Lo และคณะ, 1997 และ Schuth และคณะ, 2000) จากคุณสมบัติทั้งหมดดังกล่าวรวมทั้งปริมาณเหล็กที่พบในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีปริมาณต่างกัน จึงส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดโลหะของตัวดูดซับแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ต่างกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Xu และ Axe ที่ได้ศึกษาการเคลือบซิลิกาเจลด้วยเหล็กออกไซด์ ในปี 2004 ได้ผลดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลก่อนและหลังเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1

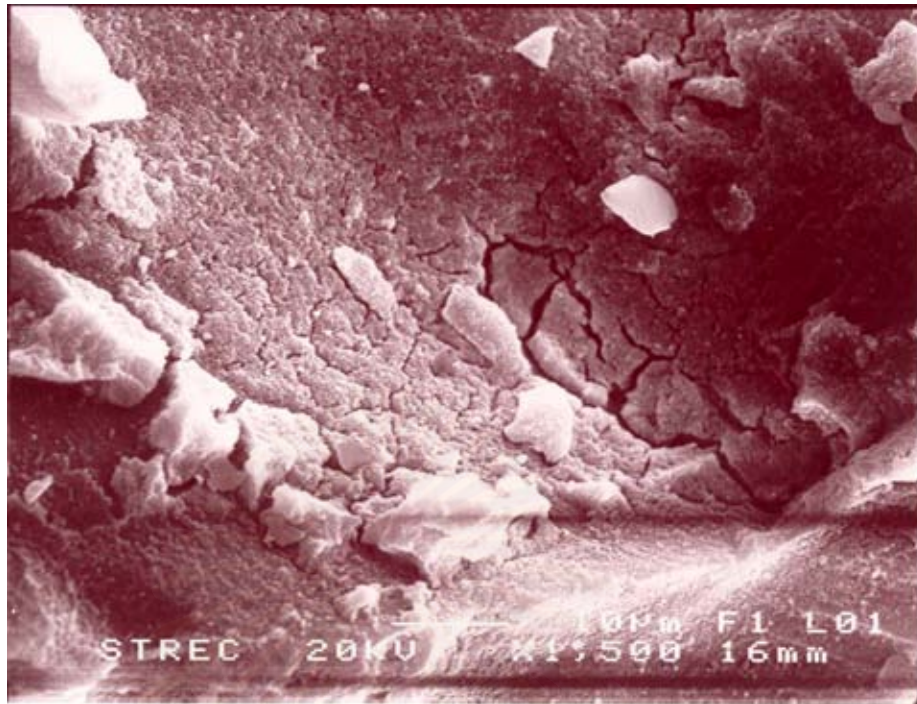
คุณสมบัติ	งานวิจัยนี้		งานวิจัยของ Xu และ Axe	
	ซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว	ซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบเหล็กออกไซด์	ซิลิกาเจลใหม่	ซิลิกาเจลใหม่เคลือบเหล็กออกไซด์
ปริมาณเหล็ก (mgFe/g)	0.20	16.50	0.31	17.64
พื้นที่ผิว (m^2/g)	353.54	112.88	0.0757	1.2092

ตารางที่ 4.6 ปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลก่อนและหลังเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2

คุณสมบัติ	งานวิจัยนี้		งานวิจัยของ Xu และ Axe	
	ซิลิกาเจล ที่ใช้แล้ว	ซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว เคลือบเหล็กออกไซด์	ซิลิกาเจลใหม่	ซิลิกาเจลใหม่เคลือบ เหล็กออกไซด์
ปริมาณเหล็ก (mgFe/g)	0.20	14.17	0.31	3.43
พื้นที่ผิว (m ² /g)	353.54	272.20	0.0757	0.5021

ในงานวิจัยของ Xu และ Axe ในปี 2004 ใช้ซิลิกาเจลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 900 μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาเจลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.063 – 0.2 mm ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับในงานวิจัยนี้มีมากกว่าในงานวิจัยของ Xu และ Axe โดยจากการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าการเคลือบทั้งสองวิธีของ Xu และ Axe ตัวดูดซับที่ได้มีปริมาณเหล็กและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่งานวิจัยนี้ตัวดูดซับมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นแต่มีพื้นที่ผิวน้อยลง เนื่องจากซิลิกาเจลที่นำมาใช้มีขนาดเล็กมากอยู่แล้วและมีพื้นที่ผิวที่สูงมาก การเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จึงไม่น่าจะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น โดยเหล็กออกไซด์ยังอาจเข้าไปแทรกหรือปิดรูพรุนของซิลิกาเจลที่มีอยู่ ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวที่น้อยลงได้ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณเหล็กในการเคลือบแบบที่ 1 จากทั้งสองงานวิจัยพบว่า ตัวดูดซับที่ได้มีปริมาณเหล็กที่ใกล้เคียงกัน คือ 16.50 mgFe/g สำหรับงานวิจัยนี้ และ 17.64 mg Fe/g สำหรับงานวิจัยของ Xu และ Axe ซึ่งการเคลือบในแบบที่ 2 งานวิจัยนี้มีปริมาณเหล็กที่พบถึง 14.17 mgFe/g ซึ่งมากกว่าในงานวิจัยของ Xu และ Axe ที่มีปริมาณเหล็กที่พบเพียง 3.43 mgFe/g

นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะของพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีด้วยเทคนิค SEM/EDX (Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X – ray Spectrometer) พร้อมการทำ mapping เพื่อดูการกระจายตัวของเหล็กที่เคลือบอยู่บนผิวของซิลิกาเจล เทียบกับซิลิกาเจลที่ผ่านการอบแต่ไม่ได้เคลือบ ดังแสดงผลในรูปที่ 4.7 – 4.10



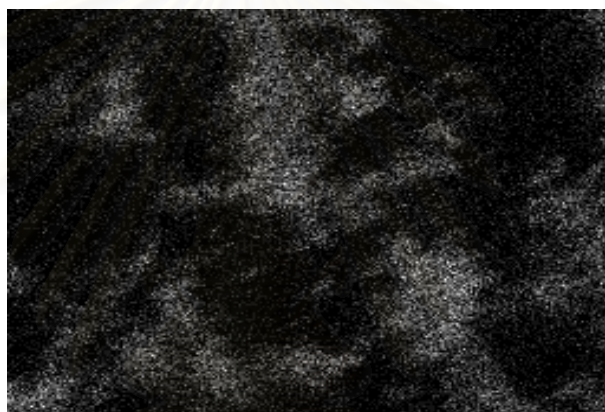
รูปที่ 4.7 พื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



รูปที่ 4.8 พื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 (กำลังขยาย 12,000 เท่า)



(A)

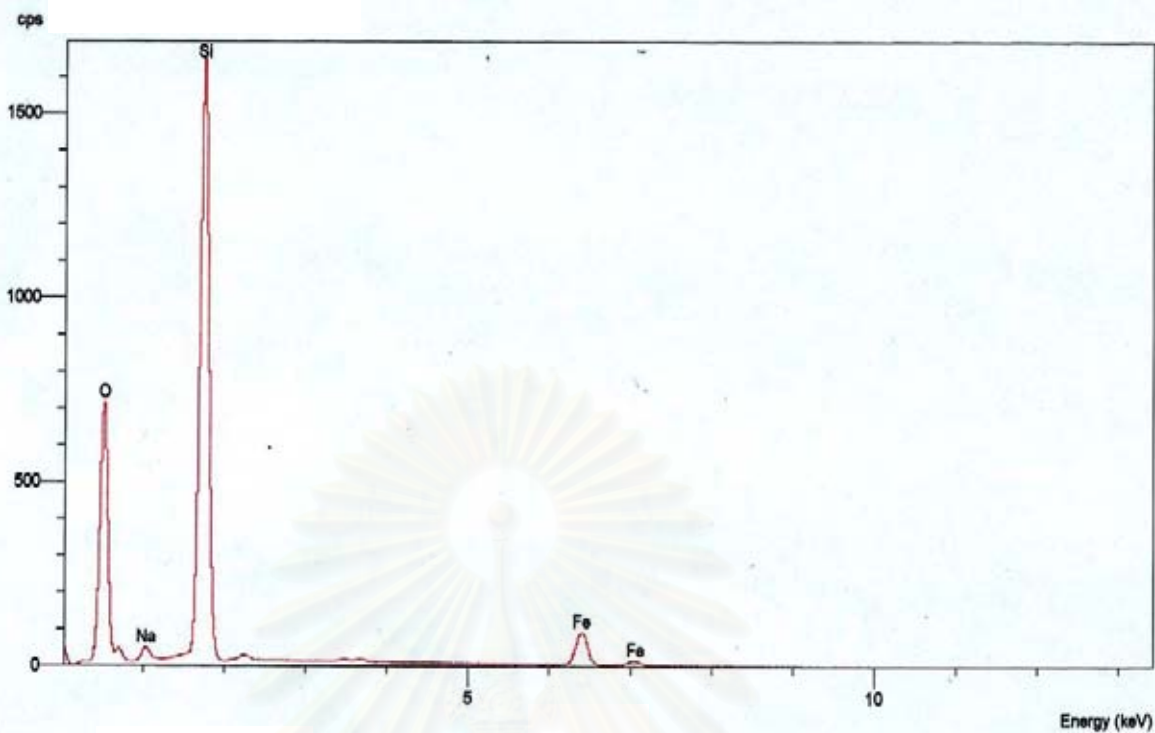


(B)

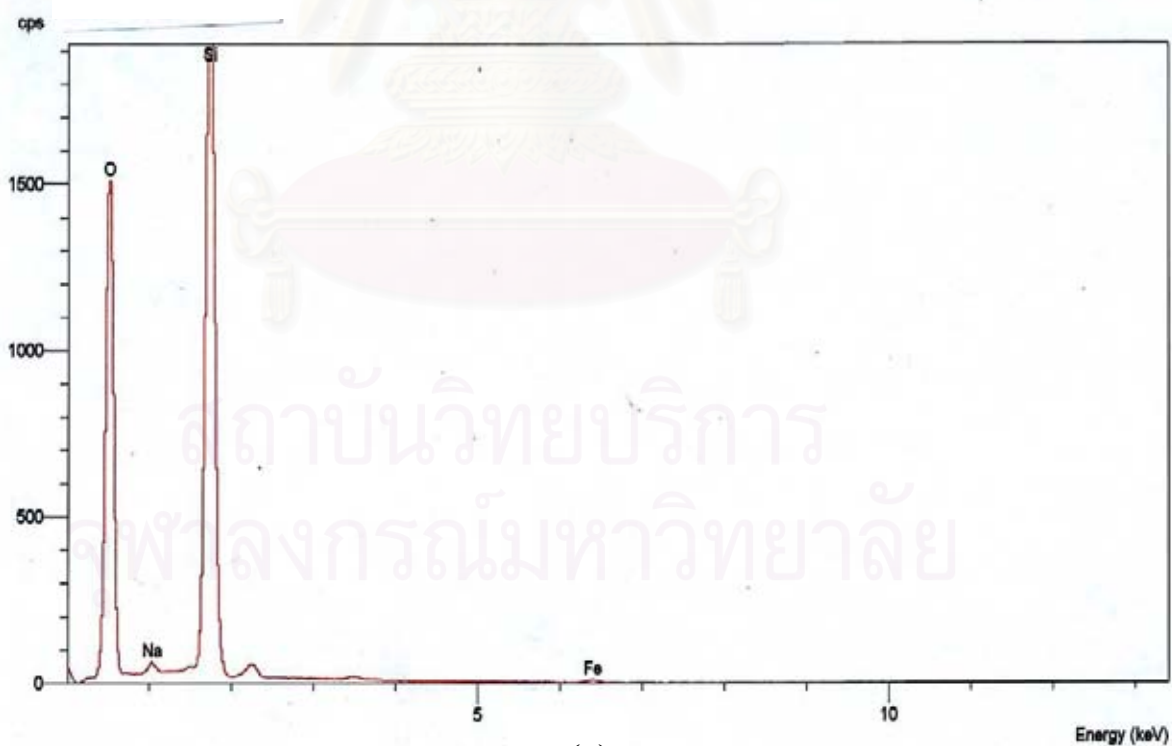


(C)

รูปที่ 4.9 ผลของ mapping แสดงการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวของซิลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบ (A) และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แบบที่ 1 (B) และแบบที่ 2 (C) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



(A)



(B)

รูปที่ 4.10 ผลของ SEM/EDX แสดงองค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวของซิลิกาเจลเคลือบ
เหล็กออกไซด์แบบที่ 1 (A) และแบบที่ 2 (B)

จากภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM ประกอบกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค SEM/EDX พร้อมทั้งการทำ mapping เพื่อดูการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวของซิลิกาเจล ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.10 สามารถพิสูจน์ได้ว่าพื้นผิวของซิลิกาเจลที่ใช้แล้วมีเหล็กออกไซด์เคลือบอยู่จริง โดยการเคลือบในแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.7 ที่กำลังขยายของภาพ 1,500 เท่า และผลของ mapping ดังรูปที่ 4.9 (B) พบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีการกระจายของเหล็กออกไซด์ไม่สม่ำเสมอและมีรอยแตกของเหล็กออกไซด์ปรากฏอยู่ เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมที่ต้องทำให้เหล็กตกตะกอนเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์อยู่ก่อนแล้ว ก่อนนำไปสัมผัสกับซิลิกาเจล ดังนั้นลักษณะการเคลือบและการเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ที่ได้จึงไม่ทั่วถึง โดยเหล็กออกไซด์จะรวมตัวอยู่เป็นกลุ่มๆ บนผิวของซิลิกาเจล ส่วนการเคลือบในแบบที่ 2 ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งใช้กำลังขยายของภาพที่ 12,000 เท่า เพื่อให้สามารถมองเห็นลักษณะของการเคลือบของเหล็กออกไซด์ได้อย่างชัดเจน รวมทั้งผลของ mapping ดังรูปที่ 4.9 (C) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์ที่สม่ำเสมอ โดยมีลักษณะในการยึดเกาะที่ติดแน่นกว่าการเคลือบในแบบที่ 1 เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียม เหล็กจะจับกับผิวของซิลิกาเจลก่อนได้อย่างทั่วถึง เพราะเหล็กยังอยู่ในรูปของสารละลาย (Fe^{3+}) ก่อนที่จะตกตะกอนและเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ในภายหลัง ดังนั้นเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั้งดั่งกล่าว

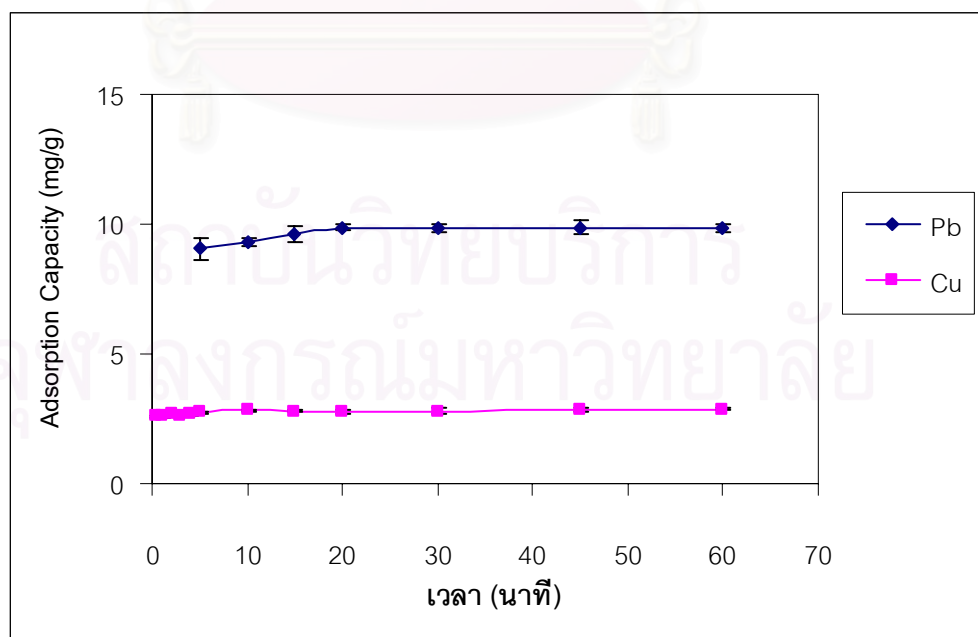
โดยในการศึกษาต่อไปจะนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้จากภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบแบบที่ 2 มาศึกษาเป็นหลัก เนื่องจากความเหมาะสมในการเตรียมที่ต้องคำนึงถึงตัวกลางที่นำมาใช้ อันได้แก่ซิลิกาเจลที่ใช้แล้ว ซึ่งวิธีการเคลือบแบบที่ 1 เป็นการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูง ก่อนนำมาสัมผัสกับซิลิกาเจลอาจส่งผลทำให้ซิลิกาเจลละลายได้ (Xu และ Axe, 2004) รวมทั้งเมื่อทำการเคลือบซ้ำประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ได้จะไม่เท่าเดิม ประกอบกับการศึกษาของ Scheidegger ในปี 1993 รวมทั้ง Lo และคณะ ในปี 1997 พบว่าตัวกลางที่เป็นทรายเมื่อเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่พีเอช 12 ด้วยวิธีการเคลือบในลักษณะเดียวกับการเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method) ในงานวิจัยนี้ ตัวดูดซับที่เตรียมได้จะมีความสามารถในการต้านทานกรดได้น้อยมาก จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย นอกจากนี้การศึกษาของ Zeng ในปี 2003 ยังพบว่า การเตรียมตัวดูดซับโดยวิธีการเคลือบในแบบที่ 1 ที่ใช้อุณหภูมิในการเคลือบสูงกว่า $250^{\circ}C$ เหล็กออกไซด์จะเกิดการยึดเกาะกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้แข็งแกร่งกว่า (adsorbent strength) ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นโดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ต่ำกว่า $250^{\circ}C$ ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้เลือกใช้ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์จากแบบที่ 2 มาใช้ในการศึกษาในตอนต่อไปทั้งหมด

4.3 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์จากวิธีการเคลือบแบบที่ 2 โดยทำการศึกษา 1. ระยะเวลาในการสัมผัส 2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ 3. พีเอชของสารละลายโลหะ 4. ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กขณะใช้กำจัดโลหะหนักน้ำเสีย และ 5. ผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก และมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 ระยะเวลาในการสัมผัส

ผลการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการนำไปกำจัดโลหะหนัก โดยเปรียบเทียบความสามารถของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดโลหะหนักที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ต่างกัน พบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มคงที่ที่ประมาณ 9.85 mg/g silica gel เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสผ่านไป 20 นาที ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 5 นาทีแรกและเริ่มคงที่ที่ประมาณ 2.80 mg/g silica gel เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสผ่านไป 10 นาที ดังรูปที่ 4.11

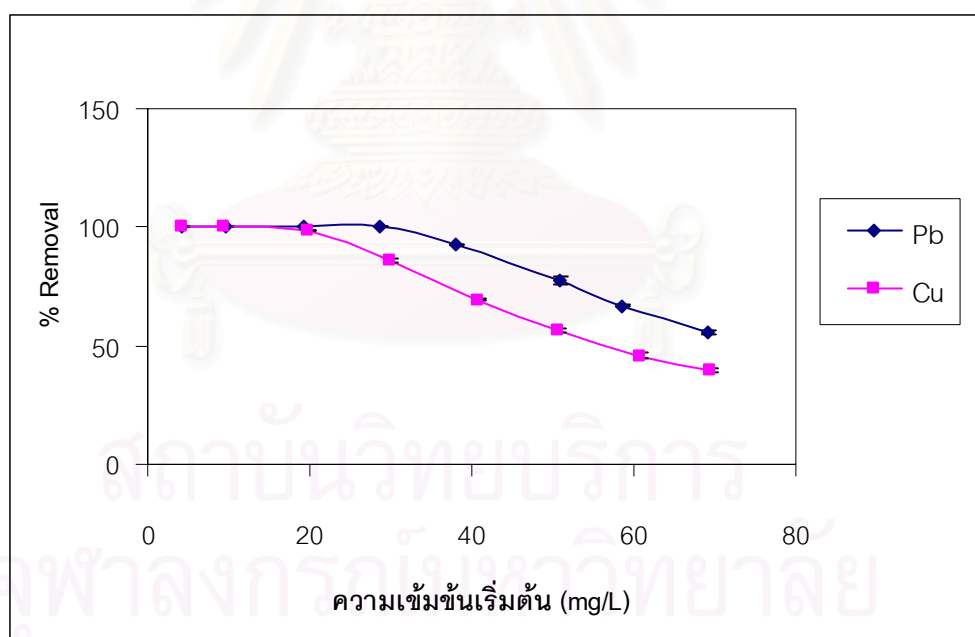


รูปที่ 4.11 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมของโลหะหนักทั้งสองจึงไม่ควรต่ำกว่า 10 นาทีสำหรับทองแดง และไม่ต่ำกว่า 20 นาทีสำหรับตะกั่ว และได้เลือกใช้เวลาในการสัมผัสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้การกำจัดโลหะหนักเกิดขึ้นได้มากที่สุดในการศึกษาขั้นต่อไป

4.3.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ

การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะที่เหมาะสมในการบำบัด เมื่อใช้อัตราส่วนตัวดูดซับ 0.1 g ต่อปริมาตรสารละลายตะกั่ว 25 mL และตัวดูดซับ 0.25 g ต่อปริมาตรสารละลายทองแดง 25 mL ผลที่ได้พิจารณาจากประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (% Removal) พบว่าซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ถึง 100% เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วต่ำกว่าหรือเท่ากับ 30 mg/L จากนั้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดก็จะลดลง ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงจากสารละลายจะได้ 100 % เมื่อโลหะมีความเข้มข้นต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 mg/L และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทองแดง ประสิทธิภาพในการกำจัดก็จะลดลงเช่นกัน ดังรูปที่ 4.12



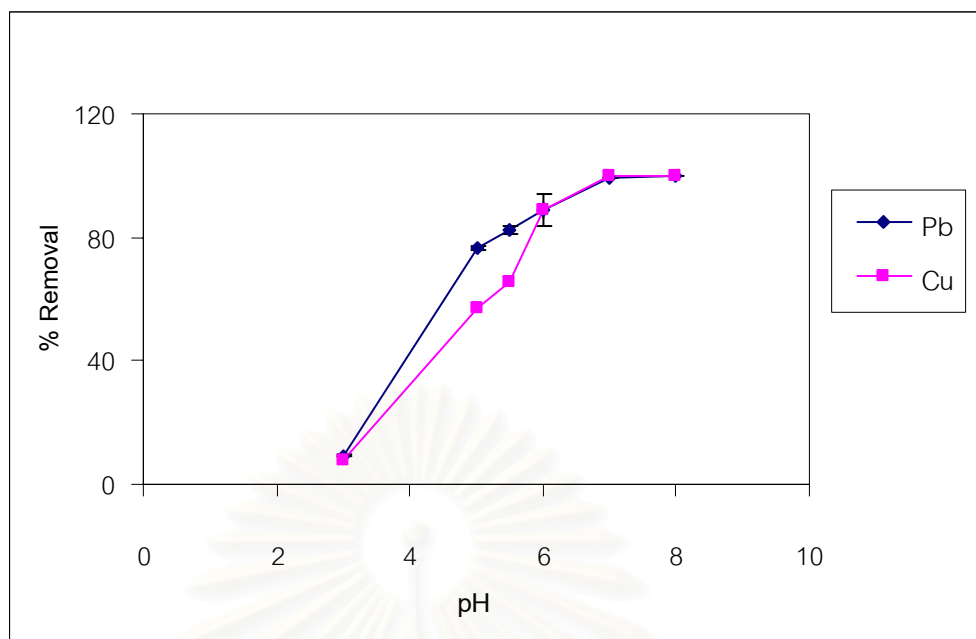
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากการทดลองพบว่า หากต้องการการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 100% ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 mg/L เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวดูดซับที่ 0.1 g ต่อปริมาตรของสารละลาย 25 mL และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงที่สามารถนำตัว

ดูดซับไปใช้บำบัดอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด คือที่ความเข้มข้นของทองแดงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 mg/L เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวดูดซับที่ 0.25 g ต่อปริมาตรของสารละลาย 25 mL เช่นกัน โดยพีเอชของสารละลายที่ใช้ประมาณ 5.5

4.3.3 พีเอชของสารละลายโลหะ

ในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาความสามารถในการจับตะกั่วและทองแดงของตัวดูดซับที่พีเอชของสารละลายอยู่ในช่วง 3 – 8 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 โดยผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้นจากพีเอช 3 ถึง 5 โดยพบว่าเมื่อสารละลายตะกั่วมีพีเอชเท่ากับ 7 หรือสูงกว่า และที่พีเอชของสารละลายทองแดงเท่ากับ 6 หรือสูงกว่า จะมีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักเกิดขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 50 mg/L และทองแดงเท่ากับ 40 mg/L ทำให้ปริมาณโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลายมีในระดับต่ำลง ดังนั้นที่พีเอชของสารละลายตะกั่วตั้งแต่ 7 ขึ้นไปและพีเอชของสารละลายทองแดงตั้งแต่ 6 ขึ้นไป กระบวนการกำจัดโลหะที่เกิดขึ้นจึงมีทั้งการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ร่วมกับการจับบนตัวดูดซับของโลหะที่ยังละลายอยู่ในสารละลาย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดยังสูงอยู่เช่นกัน โดยลักษณะตะกอนของเลดไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ที่เกิดขึ้นเป็นคอลลอยด์สีขาวขุ่นที่ไม่สามารถแยกออกจากสารละลายได้โดยการเซนทริฟิว ต่างกับตะกอนของคิวปริคไฮดรอกไซด์ ($Cu(OH)_2$) ที่เป็นตะกอนสีฟ้าขุ่นที่นอนก้นและสามารถแยกออกจากสารละลายโดยการเซนทริฟิวได้



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่พีเอชต่างๆ

การที่ตัวดูดซับสามารถกำจัดโลหะหนักได้น้อยในสารละลายที่เป็นกรด เนื่องจากภาวะที่เป็นกรด ในสารละลายจะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะไปแข่งขันกับไอออนของโลหะหนักในการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับสามารถจับกับโลหะหนักได้น้อยลง

ดังนั้นพีเอชของสารละลายโลหะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 50 mg/L และทองแดงที่ความเข้มข้น 40 mg/L คือ พีเอชของสารละลายประมาณ 5.5 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่ตัวดูดซับสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้ดีที่สุด และโลหะหนักไม่ตกตะกอน โดยพีเอชของสารละลายโลหะที่เหมาะสมอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและทองแดงที่นำมาใช้ในการบำบัดด้วย

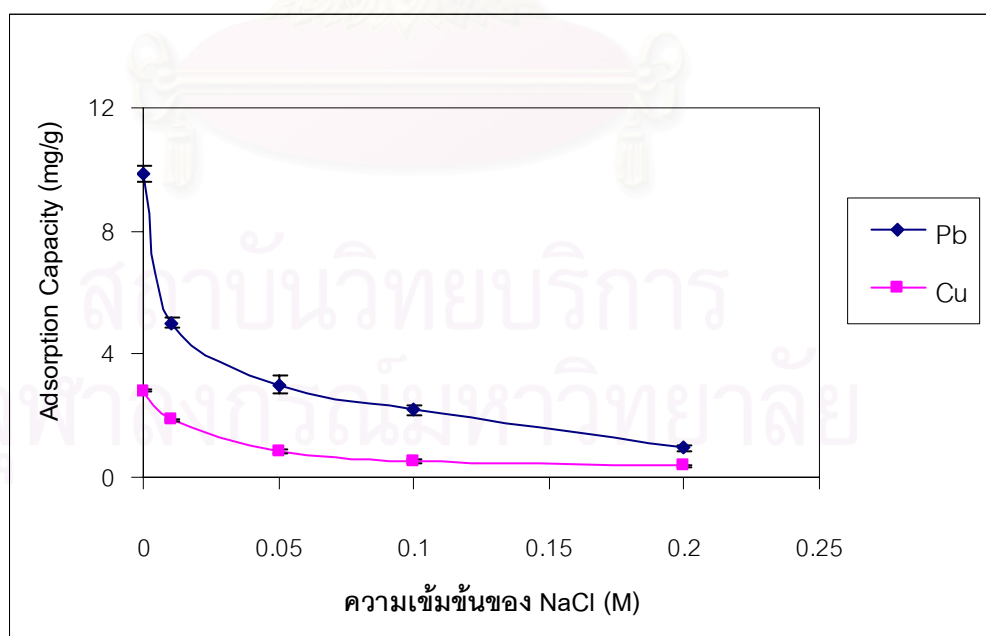
4.3.4 ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กขณะใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

พีเอชของสารละลายนอกจากจะมีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักแล้ว ยังมีผลต่อการชะละลายของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของซีลิกาเจลอีกด้วย ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อใช้สารละลายโลหะที่พีเอชอยู่ในช่วง 3 – 8 มาทำการทดลองและตรวจวัดการชะละลายของเหล็กออกไซด์สารละลาย พบว่า ในสารละลายโลหะที่พีเอชเท่ากับ 3 เหล็กที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวของซีลิกาเจลจะถูกชะออกมาในสารละลาย โดยสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย

ตะกั่วได้เท่ากับ 0.20 mg/L และในสารละลายทองแดงตรวจพบในปริมาณที่น้อยกว่า 0.18 mg/L เมื่อสารละลายตะกั่วใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g และสารละลายทองแดงใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 g ส่วนสารละลายที่พีเอชสูงกว่า 3 ไม่พบว่ามีเหล็กอยู่ในสารละลายโลหะหนักที่ผ่านการบำบัดหรือมีอยู่ในระดับความเข้มข้นที่น้อยกว่า 0.18 mg/L ซึ่งเป็น Limit of Detection ของการวิเคราะห์เหล็กด้วยเทคนิค FAAS ดังนั้นในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ สารละลายควรมีพีเอชสูงกว่า 3 เพื่อป้องกันการชะละลายของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนซลิคาเจลไม่ให้หลุดออกมา

4.3.5 ผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย

การศึกษาผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย เนื่องมาจากการนำตัวดูดซับไปใช้กำจัดโลหะหนักนั้นต้องคำนึงถึงภาวะของน้ำเสียจริงที่มีอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปในน้ำเสียจริงจะมีแคทไอออนและแอนไอออนเจือปนอยู่เป็นจำนวนมาก และอาจมีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของตัวดูดซับ โดยในการศึกษาได้ทำการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นการเติมแคทไอออนได้แก่ Na^+ และแอนไอออนได้แก่ Cl^- ลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นตัวแทนของแคทไอออนและแอนไอออนที่มีอยู่จริงในน้ำเสียจริง โดยทุกๆ ไป โดยเติมในความเข้มข้นในช่วง 0.01 – 0.2 M ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14

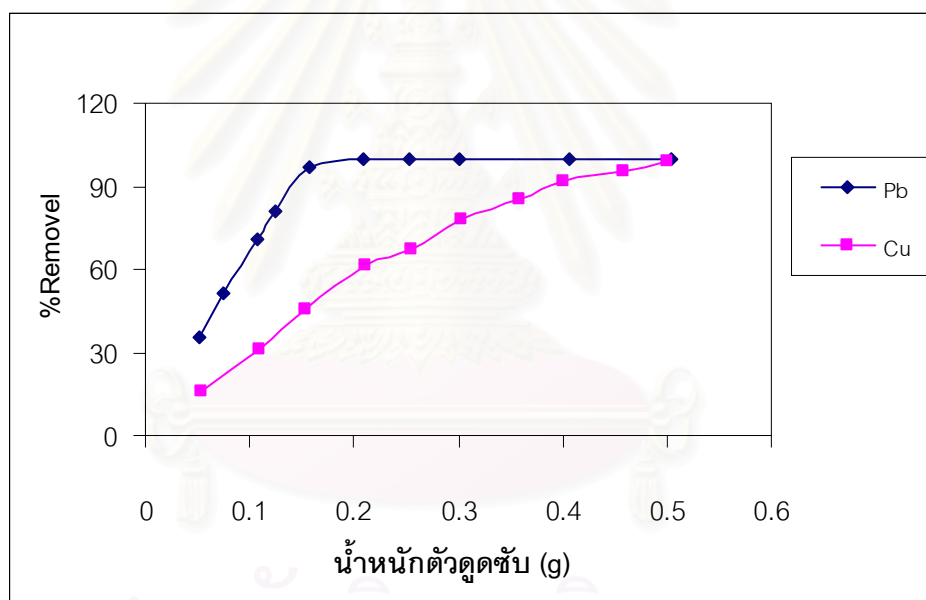


รูปที่ 4.14 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงในสารละลายโลหะที่มีเกลือ NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.14 พบว่าความเข้มข้นของเกลือ NaCl ที่เติมลงไปจะมีผลทำให้ ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดโลหะหนักได้ลดลง ที่ความเข้มข้นของ NaCl ตั้งแต่ 0.01 M ขึ้นไป และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของ NaCl สูงขึ้น เนื่องมาจากแกทไอออนที่เติมลงไปจะไปแข่งขันกับไอออนของโลหะหนักที่มีประจุบวกเหมือนกัน ทำให้ตัวดูดซับมีตำแหน่งหรือพื้นที่ว่างที่จะใช้จับกับโลหะหนักได้น้อยลง นอกจากนี้เหล็กออกไซด์ไม่ได้มีความจำเพาะในการเลือกจับกับโลหะ ดังนั้นในสารละลายโลหะที่มีเกลือ NaCl ละลายอยู่ในปริมาณมากจึงทำให้ตัวดูดซับสามารถจับกับโลหะหนักได้น้อยลง รวมถึงในภาวะที่ทำการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะก็ไม่ได้เปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากการตกตะกอนกับ Cl^- เป็น เลดคลอไรด์ (PbCl_2) และคิวปริกคลอไรด์ (CuCl_2) ดังนั้น Cl^- จึงไม่น่าจะมีผลต่อการบำบัดที่ลดลงแต่อย่างใด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lo และคณะ ในปี 1997 ที่ใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยพบว่าการดูดซับโลหะหนักจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อในสารละลายมี ionic strength ในระดับต่ำ โดยจากการทดลองเติม NaNO_3 ที่ระดับความเข้มข้น 0.01 M พบว่าตัวดูดซับสามารถกำจัดโลหะได้สูงกว่าที่ความเข้มข้นของ NaNO_3 เท่ากับ 0.1 M ในขณะที่งานวิจัยของชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน ในปี 2543 การเติม NaNO_3 ในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 0.05 – 0.1 M จะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของตัวดูดซับที่ได้

4.4 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสีย ทำการทดลอง โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่ศึกษาได้ในตอนที่ 4.3 คือใช้ระยะเวลาในการสัมผัสนาน 30 นาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วและทองแดงเท่ากับ 50 mg/L และ 40 mg/L ตามลำดับ และพีเอชของสารละลายประมาณ 5.5 (ซึ่งเป็นพีเอชปกติของสารละลายโลหะที่ไม่ต้องปรับพีเอช) จากนั้นเปิดสารละลายมา 25 mL ใส่ในซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ในปริมาณต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0.05 – 0.5 g แล้วนำไปเขย่า กรองแยกซิลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือนด้วยเครื่อง FAAS ข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 โดยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ ได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วและทองแดงด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่น้ำหนักต่างๆ

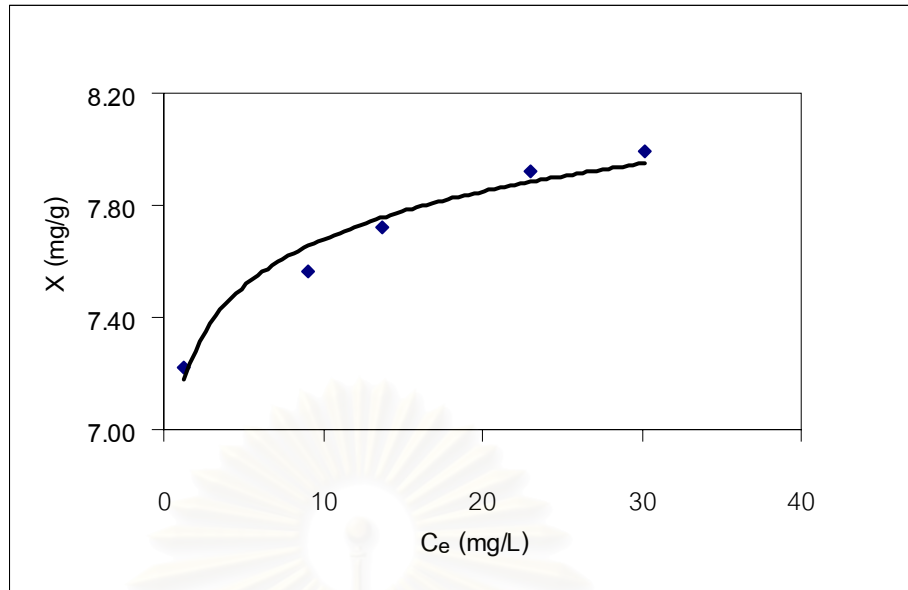
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะที่เหลือนอยู่ในสารละลายที่จุดสมดุล (C_e) กับค่าความสามารถในการดูดซับ (X) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.16 และ 4.18 เมื่อนำมาคำนวณให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นของ Logarithmic ดังสมการ $\text{Log } X = \text{Log } K + (1/n) \text{Log } C_e$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช โดย K คือค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ และ n คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ได้ดังกราฟรูปที่ 4.17 และ 4.19 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 การดูดซับตะกั่วด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่น้ำหนักต่างๆ

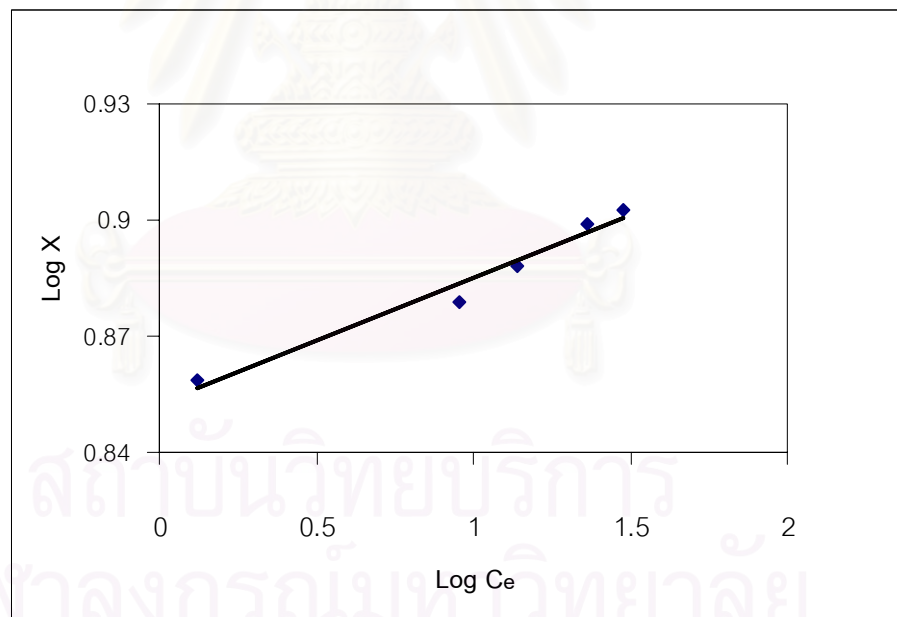
น้ำหนักซิลิกาเจล เคลือบเหล็กออกไซด์ (g)	[Pb] ที่จุดสมดุล (mg/L) (C ₀)	mgPb/gSi (X)	% Removal
0.05	30.14	7.99	35.77
0.08	23.00	7.92	50.99
0.11	13.74	7.73	70.72
0.13	9.03	7.56	80.76
0.16	1.31	7.22	97.20
0.21	0.00	5.60	100.00
0.25	0.00	4.65	100.00
0.30	0.00	3.89	100.00
0.41	0.00	2.88	100.00
0.50	0.00	2.33	100.00

ตารางที่ 4.8 การดูดซับทองแดงด้วยซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่น้ำหนักต่างๆ

น้ำหนักซิลิกาเจล เคลือบเหล็กออกไซด์ (g)	[Cu] ที่จุดสมดุล (mg/L) (C ₀)	mgCu/gSi (X)	% Removal
0.05	34.87	3.14	15.98
0.11	28.60	2.97	31.10
0.15	22.74	3.06	45.21
0.21	16.05	3.01	61.34
0.26	13.75	2.72	66.89
0.30	9.14	2.67	77.97
0.36	6.00	2.48	85.53
0.40	3.49	2.37	91.58
0.46	1.82	2.17	95.62
0.50	0.36	2.05	99.14



รูปที่ 4.16 สมดุลการดูดซับสารละลายตะกั่วของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

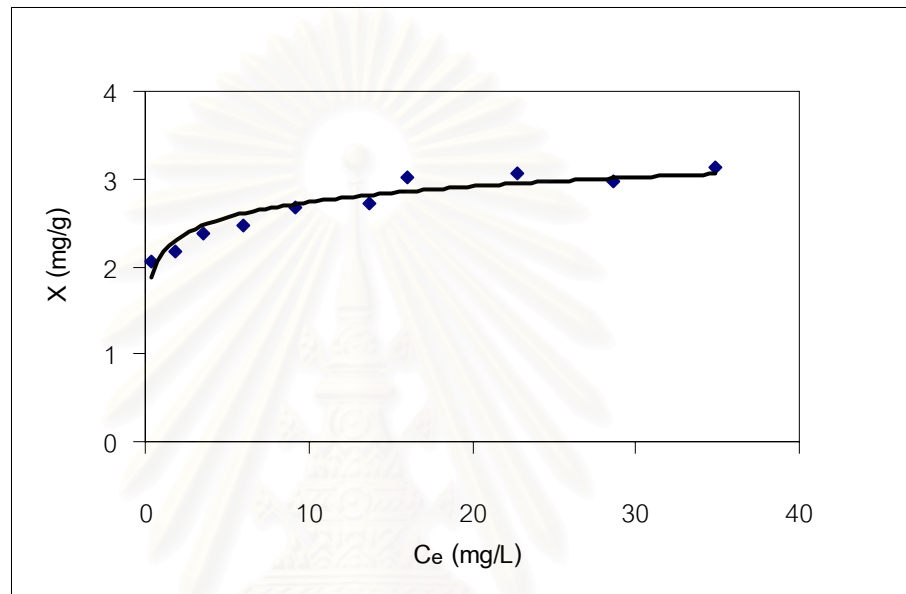


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับตะกั่วตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

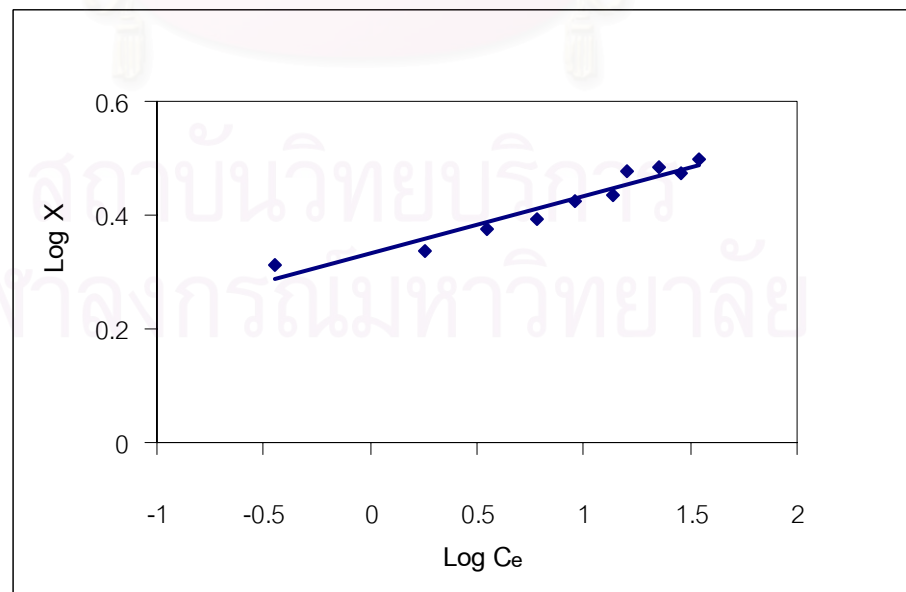
จากรูปที่ 4.17 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Log } X = 0.8527 + 0.0323 \text{ Log } C_e \quad (R^2 = 0.9669) \dots\dots\dots(4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) $\log K$ มีค่าเท่ากับ 0.8527 และ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.0323 ดังนั้นค่า K คือ 7.21 และ n คือ 26.53 โดยค่า K คือค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นค่า K ยิ่งมาก ความหนาแน่นหรือความสามารถในการดูดซับยิ่งมากขึ้น ส่วนค่า $1/n$ คือค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ โดยค่า n ที่มากกว่า 1 หมายถึงการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากความชันของ $1/n$ โดยทั่วไปต้องน้อยกว่า 1 (Vanloon และ Duffy, 2000) และใช้บอกถึงความสามารถในการดูดซับที่มีความเข้มข้นมากการดูดซับยังเกิดได้ดี



รูปที่ 4.18 สมดุลการดูดซับสารละลายทองแดงของซิติกาเจลเคลือบเปลือกออกไซด์



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับทองแดงตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

จากรูปที่ 4.24 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ 4.2

$$\text{Log } X = 0.3323 + 0.1011 \text{ Log } C_e \quad (R^2 = 0.9280) \dots\dots\dots(4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) $\text{Log } K$ มีค่าเท่ากับ 0.3323 และ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.1011 ดังนั้นค่า K คือ 2.15 และ n คือ 9.89 โดยสามารถเปรียบเทียบค่าคงที่ในการดูดซับตะกั่วและทองแดงจากสมการของฟรุนด์ลิชได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ในการดูดซับตะกั่วและทองแดงจากสมการของฟรุนด์ลิช

ค่าคงที่	ตะกั่ว	ทองแดง
K	7.21	2.15
n	26.53	9.89
1/n	0.033	0.10

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากตารางที่ 4.9 ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าทองแดง ที่ภาวะในการกำจัดเหมือนกันและน้ำหนักตัวดูดซับเท่ากัน โดยค่าคงที่ของ K และ $1/n$ สามารถนำไปคำนวณและคาดการณ์สถานการณ์เมื่อนำตัวดูดซับไปใช้กำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากรั่วไหลในระบบกำจัดน้ำเสียหรือ เมื่อใช้ในการศึกษาทดลองต่อไป

อย่างไรก็ดีไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช ที่มีความสัมพันธ์กับการดูดซับตะกั่วและทองแดงของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิว (multilayers) กล่าวคือ เมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับชั้นแรกแล้ว การดูดซับยังสามารถเกิดขึ้นได้อีก โดยโมเลกุลของการดูดซับในชั้นแรกจะเป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นต่อไป ทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์นี้ได้ (Vanloon และ Duffy, 2000) ซึ่งจากงานวิจัยของ Lai และ Chen ปี 2001 เมื่อใช้ตัวดูดซับที่เป็นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากรั่วไหล พบว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lai และคณะในปี 2000 ที่ศึกษาโดยใช้โลหะทองแดงเพียงชนิดเดียว ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้พบความสัมพันธ์ที่แตกต่างไปจากงานวิจัยที่เคยมีมา จึงมีความเป็นไปได้ว่าตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากตัวกลางที่ต่างกันจะมีพฤติกรรมในการดูดซับโลหะหนักที่ต่างกันด้วย

4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซีลิกาเจลที่มาจากต่าง ห้องปฏิบัติการ

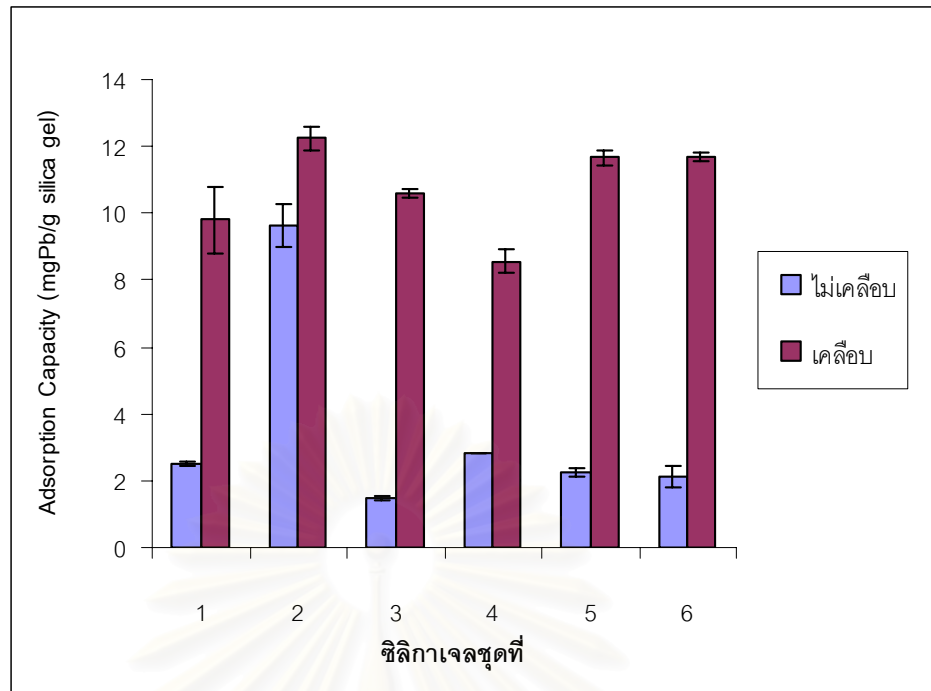
ซีลิกาเจลใช้แล้วที่มาจากคนละแห่งอาจมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ดังนั้นจึงได้นำซีลิกาเจลใช้แล้ว 6 ชุด (ขนาดอนุภาค 0.063 – 0.2 มิลลิเมตร) มาอบและทำการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ภาวะเดียวกันจากการเคลือบในแบบที่ 2 เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียเปรียบเทียบกับซีลิกาเจลชุดเดียวกันที่ผ่านการอบแต่ไม่ได้ทำการเคลือบ ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงของซีลิกาเจลเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และไม่ได้เคลือบทั้ง 6 ชุด

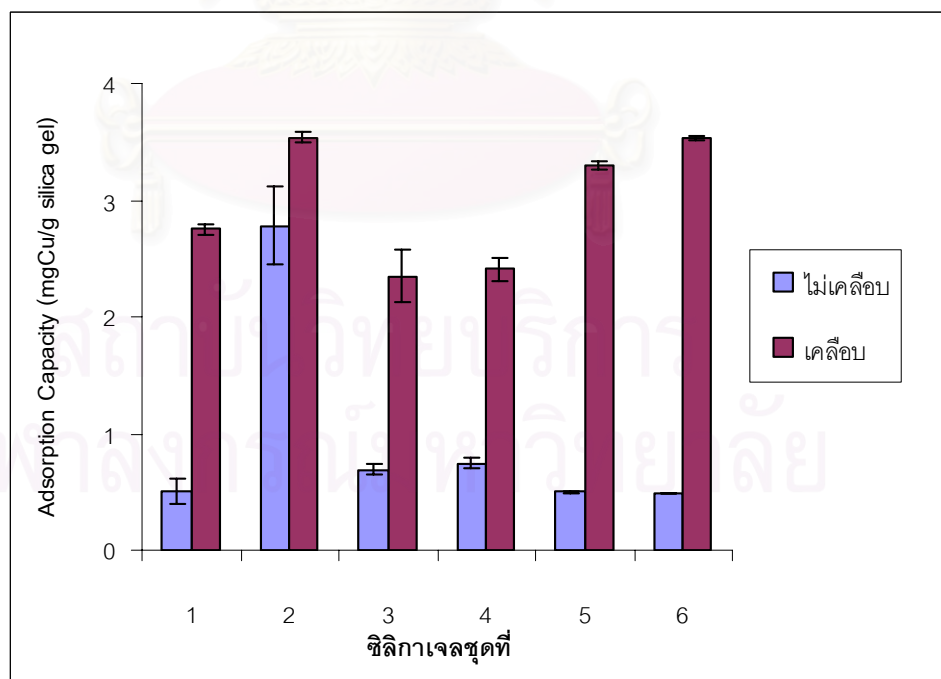
ซีลิกาเจล ชุดที่	Adsorption Capacity (mg/g) ^a			
	ตะกั่ว		ทองแดง	
	ไม่เคลือบ	เคลือบ	ไม่เคลือบ	เคลือบ
1	2.50 ± 0.08	9.80 ± 1.00	0.51 ± 0.11	2.75 ± 0.05
2	9.65 ± 0.64	12.24 ± 0.33	2.78 ± 0.33	3.54 ± 0.04
3	1.47 ± 0.04	10.59 ± 0.11	0.69 ± 0.04	2.35 ± 0.23
4	2.83 ± 0.02	8.57 ± 0.36	0.74 ± 0.05	2.41 ± 0.10
5	2.23 ± 0.13	11.68 ± 0.23	0.50 ± 0.01	3.30 ± 0.04
6	2.12 ± 0.30	11.69 ± 0.13	0.49 ± 0.00	3.53 ± 0.02

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n = 3)

ผลการทดลองพบว่าซีลิกาเจลที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าซีลิกาเจลที่ไม่ได้เคลือบ ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.19 และ 4.20 และเมื่อทำการวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) จากตาราง t ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าเฉลี่ยของความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของซีลิกาเจลทั้ง 6 ชุด ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อพิจารณาเทียบกับโลหะชนิดเดียวกัน ดังนั้นตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากซีลิกาเจลใช้แล้วที่มาจากต่างห้องปฏิบัติการมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันในการกำจัดโลหะหนัก โดยมีค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงอยู่ในช่วง 8.21 – 11.82 mg/g และ 2.12 – 3.55 mg/g ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลใช้แล้ว 6 ชุด ที่อบแห้งไม่เคลือบและที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.21 ความสามารถในการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลใช้แล้ว 6 ชุด ที่อบแห้งไม่เคลือบและที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

4.6 การทดสอบกับน้ำเสียจริง

นำซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดที่ 6 มาใช้ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสียจริง เนื่องจากเป็นซลิกาเจลชุดที่มีความสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับซลิกาเจลชุดเดียวกันที่ไม่ได้เคลือบ (จากผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.5) โดยน้ำเสียจริงที่นำมาใช้เป็นน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ที่จับเก็บโลหะหนักแต่ละชนิดไว้คนละขวด ลักษณะภายนอกของน้ำเสีย สี และมึลลิน เมื่อนำน้ำเสียไปวัดพีเอชเริ่มต้นพบว่าสารละลายตะกั่วมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.16 และสารละลายทองแดงมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.20 จากนั้นจึงทำการปรับพีเอชเป็น 5.70 สำหรับสารละลายตะกั่ว และ 5.63 สำหรับสารละลายทองแดงตามลำดับ แล้วนำสารละลายไปวัดหาปริมาณโลหะหนัก ซึ่งพบว่าน้ำเสียมีความเข้มข้นของตะกั่วและทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 22.66 mg/L และ 13.11 mg/L ตามลำดับ จากนั้นเปิดน้ำเสียแต่ละประเภทมา 25 mL ใส่ในซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.1 g สำหรับตะกั่วและ 0.25 g สำหรับทองแดง แล้วนำไปเขย่า กรองแยกซลิกาเจลและนำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วย FAAS ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์

สารละลายโลหะ	Adsorption Capacity (mg/g) ^a	% Removal ^a
ตะกั่ว	4.41 ± 0.17	89.48 ± 1.52
ทองแดง	1.05 ± 0.02	83.52 ± 0.53

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n = 3)

ผลการทดลองพบว่าซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดที่ 6 มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงได้เท่ากับ 4.41 และ 1.05 mg/g ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ 89.48% และมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงได้ 83.52% โดยในน้ำเสียยังคงมีตะกั่วเหลืออยู่ที่ความเข้มข้น 2.28 mg/L และมีทองแดงเหลืออยู่ที่ความเข้มข้น 2.16 mg/L ซึ่งการกำจัดตะกั่วให้มีความเข้มข้นไม่มากกว่า 0.2 mg/L และความเข้มข้นของทองแดงไม่มากกว่า 2 mg/L ตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดต้องใช้ปริมาณตัวดูดซับมากกว่าที่ใช้ในการทดลองนี้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่อใช้กับน้ำเสียที่มาจากแหล่งอื่นอาจมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักและองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำเสียจากต่างแหล่งย่อมมีความต่างกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะจากน้ำเสียสังเคราะห์จากผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.5 พบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วลดลงจาก

11.69 mg/g เหลือ 4.41 mg/g และความสามารถในการกำจัดทองแดงลดลงจาก 3.53 mg/g เหลือ 1.05 mg/g อันเนื่องมาจากน้ำเสียจริงมีแคโทดไอออนและแอนไอออนเจือปนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อการกำจัดตะกั่วและทองแดงของตัวดูดซับดังผลที่แสดงไว้ในตอนที่ 4.3 ดังนั้นการนำ ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้งานจริงเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด จึงควรใช้กับการกำจัด โลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนก่อนแล้ว และเมื่อ เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของตัวดูดซับที่ได้กับงานวิจัยของ Lai และ Chen ในปี 2001 ที่ใช้ตัวกลางคือทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วและทองแดง จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้เพียง 1.211 mg Pb/g sand และ 0.259 mg Cu/ g sand ตามลำดับ และ ในขณะนี้ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ใช้ตัวกลางที่เป็นซิลิกาเจล โดยเฉพาะซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วย เหล็กออกไซด์ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสียมาก่อน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วด้วยเหล็กออกไซด์และการนำไปใช้กำจัดตะกั่วและทองแดงในน้ำเสีย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบซิลิกาเจลด้วยเหล็กออกไซด์ จากการเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method) ซึ่งเป็นการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูงก่อนนำไปเคลือบบนซิลิกาเจล คือ ใช้สารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้น 0.35 %w/v ปริมาตร 10 mL ที่พีเอชของสารละลายเหล็กอยู่ในช่วง 12.0 ± 0.3 ต่อซิลิกาเจล 5 g ที่ผ่านการอบมาก่อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบแบบที่ 2 (Modified Precipitation Method) ซึ่งเป็นการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนไปพร้อมๆ กับเคลือบอยู่บนผิวของซิลิกาเจล คือ ใช้สารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้น 0.28 %w/v ปริมาตร 25 mL ต่อซิลิกาเจล 5 g ที่ผ่านการอบมาก่อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปรับพีเอชของละลายเหล็กให้อยู่ในช่วง 7.0 ± 0.5 โดยใช้อุณหภูมิในการเคลือบที่ 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และอบต่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากเคลือบแล้วซิลิกาเจลที่ได้มีความสามารถในการจับกับโลหะหนักสูงขึ้น

2. การเคลือบซิลิกาเจลด้วยเหล็กออกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลลดลงจากเดิมก่อนเคลือบ โดยพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลก่อนเคลือบคือ $353.54 \text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.56 \text{ cm}^3/\text{g}$ แต่หลังจากเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในแบบที่ 1 ทำให้พื้นที่ผิวลดลงเหลือ $112.88 \text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.47 \text{ cm}^3/\text{g}$ ส่วนการเคลือบในแบบที่ 2 มีพื้นที่ผิว $272.20 \text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.50 \text{ cm}^3/\text{g}$

3. จากการศึกษภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายโลหะ และพีเอชของสารละลายรวมทั้งแคปไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย มีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ดังนี้

3.1 ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วคือ ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 50 mg/L โดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับ 0.1 g ต่อปริมาตรของสารละลายโลหะ 25 mL และพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5.5

3.2 ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงคือ ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองแดงเท่ากับ 40 mg/L โดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับ 0.25 g ต่อปริมาตรของสารละลายโลหะ 25 mL และพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5.5

3.3 ผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสียจากการเติมเกลือ NaCl ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 M ขึ้นไป ส่งผลให้ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้น้อยลง และจะกำจัดโลหะหนักได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นของเกลือ NaCl เพิ่มขึ้น

3.4 เมื่อพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 3 จะทำให้เหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของซิลิกาเจลถูกชะละลายออกมาในสารละลาย โดยสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายตะกั่วได้เท่ากับ 0.20 mg/L และในสารละลายทองแดงได้ในปริมาณที่น้อยกว่า 0.18 mg/L

4. ผลการทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่าการกำจัดตะกั่วและทองแดงของซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

5. ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ 6 ชุด ที่มาจากต่างแหล่งสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้อยู่ในช่วง 8.21 – 11.82 mgPb/g silica gel และ 2.12 – 3.55 mgCu/g silica gel ตามลำดับ

6. เมื่อนำซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์มาใช้กับน้ำเสียจริง ผลที่ได้พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วได้ 4.41 mgPb/g silica gel และกำจัดทองแดงได้ 1.05 mgCu/g silica gel โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงได้เท่ากับ 89.48% และ 83.52% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีการเคลือบแบบใหม่ และทำการศึกษาช่วงของตัวแปรที่กว้างขึ้น เช่น เรื่องของ อุณหภูมิและเวลาในการอบและการเคลือบ เพื่อให้ได้ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น

2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ พร้อมทั้งทำการทดลองแบบ คอลัมน์เพิ่มเติม

3. ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ เพื่อศึกษาว่าซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่ ก่อนที่จะนำไปทำลายฤทธิ์หรือกำจัดโดยการฝังกลบได้ เลยหากมีการชะละลายของโลหะหนักออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าที่กฎหมายกำหนด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กนกวรรณ จันทาญ. 2544. การดูดซับคอปเปอร์และซิงค์ไอออนของเกอร์ไทด์: การจำลองและโพเทนชิโอเมทรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กมลดา บรรณวิจิตร. 2544. การกำจัดเหล็กในน้ำสำหรับเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบปิดด้วยวิธีออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จันทนา จันทร์ภักดี. 2536. การปนเปื้อนของสารตะกั่วในแม่น้ำเจ้าพระยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิตตกานต์ สินธุเสก. 2544. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบทองแดงเชิงซ้อนโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์. 2543. ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โชคชัย ยะชูศรี. 2536. พืชรองเนียบพลับของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อไร่น้ำแดง (Moina macrocopa Straus). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา นันทพุลทรัพย์. 2544. ผลของความแรงไอออนและสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พนจิตร ธนสิน. 2539. การกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สุพพชา ตั้งเกียรติตระกูล. 2545. การดูดซับคอปเปอร์และซิงก์ไอออนบนเกอร์ไทต์. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาพ ศิลปคัมภีร์ภาพ และ สุพจน์ อ้วนเจริญกุล. 2538. การเตรียมและตรวจสอบคุณภาพของซิลิกาเจลที่ได้จากเถ้าแกลบ. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โสภณ เรืองสำราญ, สุพิน ต่างวิวัฒน์ และ ศรีไฉล ขุนทน. 2540. โครงการการผลิตซิลิกาเจลดูดความชื้นจากเถ้าแกลบ. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาจพบ เนียมนาค. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบเหล็ก (III) ออกไซด์. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Benjamin, M.M., R.S. Sletten, R.P. Bailey, and T. Bennett. (1996). Sorption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand. Water Research. 30: 2609 – 2620.
- Bois, L., and others. 2003. Functionalized silica for heavy metal ions adsorption. Colloids and Surfaces A:Physicochem. Eng. 221: 221 – 230.
- Chiron, N., R. Guiler, and E. Deydier. 2003. Adsorption of CU(II) and Pb(II) onto a grafted silica : isotherms and kinetic model. Water Research. 37: 3079 – 3086.
- Cotton, F.A., G. Wilkinson, C. A. Murillo, and M. Bochmann. 1999. Advanced inorganic chemistry. 6 th ed. New York : John Wiley & Sons.
- Eckenfelder, W.W. 1981. Application of adsorption to wastewater treatment. Tennessee: Enviropress.
- Eckenfelder, W.W. 2000. Industrial water pollution control. 3 rd ed. Boston: McGraw-Hill.
- Edwards, M., and M.M. Benjamin. 1989. Adsorption filtration using coated sand: a new approach for treatment of metal – bearing wastes. J. Water Pollut. Control Fed. 61: 1523 – 1533.
- Edwards, M., and M.M. Benjamin. 1989. Regeneration and reuse of iron hydroxide adsorbents in treatment of metal – bearing wastes. J. Water Pollut. Control Fed. 61: 481 – 490.
- Ghosh, M.M. 1965. Removal of iron from ground water by filtration through coal. J. AWWA. (july): 385 – 389.

- Gushikem, Y., and S.S. Rosatto. 2001. Metal oxide thin films grafted on silica gel surface: recent advances on the analytical application of these materials. J. Braz. Chem. Soc. 12: 695 – 705.
- Katsyiannis, I. A., and A. I. Zouboulis. 2002. Removal of arsenic from contaminated water sources by sorption onto iron-oxide-coated polymeric materials. Water Research. 36: 5141 – 5155.
- Koretsky, C. 2000. The significance of surface complexation reactions in hydrologic system: a geochemistry's perspective. Journal of hydrology. 230: 127 – 171.
- Lai, C.H., and C.Y. Chen. 2001. Removal of metal ions and humic acid from water by iron-coated filter media. Chemosphere. 44: 1177 – 1184.
- Lai, C.H., C.Y. Chen, P.H. Shih, and T.H. Hsia. 2000. Competitive adsorption of copper and lead ions on an iron – coated sand from water. Water Science and Technology. 42: 149 – 154.
- Lai, C.H., S.L. Lo, and H.L. Chiang. 2000. Adsorption/desorption properties of copper ions on the surface of iron – coated sand using BET and EDAX analyses. Chemosphere. 41: 1249 – 1255.
- Lo, S.L., H.T. Jeng, and C.H. Lai. 1997. Characteristics and adsorption properties of iron – coated sand. Water Science and Technology. 35: 63 – 70.
- Meng, X., and R.D. Letterman. 1993. Effect of component oxide interaction on the adsorption properties of mixed oxides. Environ. Sci. Technol. 27: 970 – 975.
- O'Neill, P. 1993. Environmental chemistry. 2 nd ed. London : Chapman & Hall.
- Scheidegger, A., M. Borkovec, and H. Sticher. 1993. Coating of silica sand with goethite : preparation and analytical identification. Geoderma. 58: 43 – 65.
- Schluter, T., I. Berg, M. Dorger, and G. Gercken. 1995. Effect of heavy metal ions on the release of reactive oxygen intermediates by bovine alveolar macrophages. Toxicology. 98: 47 – 55.
- Schuth, F., K.S.W. Sing, and J. Weitkamp. 2000. Handbook of porous solids. Vol. 3 and 5. U.S.A.: Wiley-VCH.
- Snoeyink, V.L., and D. Jenkins. 1980. Water chemistry. New York : Wiley.
- Sullivan, J.B., and G.R. Krieger. 1992. Hazardous materials toxicology : clinical principles of environmental health. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Szecsody, J.E. J.M. Zachara, and P.L. Bruckhart. 1994. Adsorption – dissolution reactions affecting the distribution and stability of Co^{II} EDTA in iron oxide – coated sand.

Environ. Sci. Technol. 28: 1706 – 1716.

Thurman, E.M., and M.S. Mills. 1998. Solid phase extraction. Vol. 147. Wineforder. USA. : Jonh Wiley & Sons.

Vanloon, G.W., and S.J. Duffy. 2000. Environmental chemistry: a globle perspective. New York: Oxford University Press.

Xu, Y., and L. Axe. 2004. Synthesis and characterization of iron oxide – coated silica and its effect on metal adsorption. Journal of colloid and interface science. (article in press)

Zeng, L. 2003. A method for preparing silica – containing iron (III) oxide adsorbents for arsenic removal. Water Research. 37: 4351 – 4358.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมโดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอช 4.18 ถึง 12.24

pH ของสารละลายเหล็ก	Adsorption Capacity (mg/g) ^a
4.18	1.00
9.53	1.23
10.48	1.81
11.64	2.02
12.24	6.43

ใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 40.21 mg/L ปริมาตร 50 mL, pHของสารละลายเท่ากับ 5.43

^a ค่าเฉลี่ย (n = 2)

ตารางที่ 2 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลที่ไม่ได้อบกับที่อบที่อุณหภูมิ 100^oC เวลา 24 ชั่วโมง และ 500^oC เวลา 3 ชั่วโมง

Adsorption Capacity (mg/g) ^a		
ไม่ได้อบ	อบ 100 ^o C เวลา 24 ชม.	อบ 500 ^o C เวลา 3 ชม.
0.45	1.16	3.25

ใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 41.50 mg/L ปริมาตร 50 mL, pHของสารละลายเท่ากับ 5.35

^a ค่าเฉลี่ย (n = 2)

ตารางที่ 3 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซลิคาเจลที่ไม่ได้อบกับที่อบที่อุณหภูมิ 100^oC เวลา 24 ชั่วโมง และ 500^oC เวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

Adsorption Capacity (mg/g) ^a		
ไม่ได้อบ	อบ 100 ^o C เวลา 24 ชม.	อบ 500 ^o C เวลา 3 ชม.
6.43	8.93	8.84

ใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 40.93 mg/L ปริมาตร 50 mL, pHของสารละลายเท่ากับ 5.41

^a ค่าเฉลี่ย (n = 2)

ตารางที่ 4 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิติกาเจลเคลือบเปลือกออกไซด์ที่ความเข้มข้นของเหล็ก 0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16, 6.93 %w/v และพีเอชของสารละลายเหล็กเท่ากับ 12.0 ± 0.3

ความเข้มข้นของเหล็ก (%w/v)	Adsorption Capacity (mg/g) ^a
0.35	8.98
0.69	9.11
1.39	8.93
2.77	8.74
4.16	8.94
6.93	9.38

ใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 42.35 mg/L ปริมาตร 50 mL, pHของสารละลายเท่ากับ 5.31

^a ค่าเฉลี่ย (n = 2)

ตารางที่ 5 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซิติกาเจลชนิดที่ 1 ที่เคลือบด้วยเปลือกออกไซด์ที่ความเข้มข้นของเหล็กต่างๆ

ความเข้มข้นของเหล็ก (%w/v)	Adsorption Capacity (mg/g)			
	เคลือบครั้งที่ 1	เคลือบครั้งที่ 2	เคลือบครั้งที่ 3	เฉลี่ย \pm SD
0 ^a (blank)	0.51	0.57	0.46	0.51 \pm 0.06
0 ^b	0.72	1.07	0.73	0.84 \pm 0.20
0.06	1.64	1.58	1.63	1.62 \pm 0.03
0.14	2.35	2.21	2.51	2.36 \pm 0.15
0.28	2.25	2.14	2.74	2.38 \pm 0.32
0.55	2.67	3.00	2.51	2.73 \pm 0.25
1.11	2.18	2.59	2.74	2.50 \pm 0.29

การเคลือบครั้งที่ 1, 2 และ 3 ทดสอบการดูดซับโลหะในแต่ละครั้งโดยใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 45.89, 39.09 และ 40.28 mg/L ตามลำดับ และใช้ปริมาตรสารละลาย 50 mL

^a ซิติกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แต่ไม่ผ่านการเคลือบ

^b ซิติกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และผ่านขั้นตอนการเคลือบทั้งหมด แต่ไม่มีการเติมเฟอร์ริกไนเตรด

ตารางที่ 6 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซีลิกาเจลชนิดที่ 2 ที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นของเหล็กต่างๆ

ความเข้มข้นของเหล็ก (%w/v)	Adsorption Capacity (mg/g)			
	เคลือบครั้งที่ 1	เคลือบครั้งที่ 2	เคลือบครั้งที่ 3	เฉลี่ย \pm SD
0 ^a (blank)	0.66	0.74	0.67	0.69 \pm 0.04
0 ^b	0.62	0.98	0.70	0.77 \pm 0.19
0.06	1.46	1.70	1.51	1.56 \pm 0.12
0.14	2.17	2.38	2.63	2.40 \pm 0.23
0.28	1.93	2.55	2.29	2.26 \pm 0.31
0.55	1.99	2.35	2.33	2.22 \pm 0.20
1.11	2.14	2.68	3.16	2.66 \pm 0.51

การเคลือบครั้งที่ 1, 2 และ 3 ทดสอบการดูดซับโลหะในแต่ละครั้งโดยใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 41.58, 40.67 และ 40.59 mg/L ตามลำดับ และใช้ปริมาตรสารละลาย 50 mL

^a ซีลิกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แต่ไม่ผ่านการเคลือบ

^b ซีลิกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และผ่านขั้นตอนการเคลือบทั้งหมด แต่ไม่มีการเติมเฟอร์ริกไนเตรต

ตารางที่ 7 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซีลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ระยะเวลาในการเก็บซีลิกาเจลที่อบแล้ว 1, 15, 30, 45, 60 และ 75 วัน ก่อนนำมาเคลือบ

ระยะเวลาในการเก็บ ซีลิกาเจลที่อบแล้ว (วัน)	Adsorption Capacity (mg/g) ^a
1	2.25 \pm 0.11
15	2.35 \pm 0.01
30	2.41 \pm 0.07
60	2.51 \pm 0.05
75	2.72 \pm 0.07

^a ค่าเฉลี่ย \pm SD (n = 3)

ตารางที่ 8 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของซีลีกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1, 15, 30, 60 และ 75 วัน ก่อนนำมาดูดซับโลหะ

ระยะเวลาในการเก็บ ซีลีกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ (วัน)	Adsorption Capacity (mg/g) ^a
1	2.72 ± 0.07
15	2.76 ± 0.01
30	2.64 ± 0.05
63	2.71 ± 0.10
75	2.71 ± 0.03

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n = 3)

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ % Fe₂O₃ ด้วยเครื่อง X – Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ของซีลีกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 2 (Modified Precipitation Method)

ความเข้มข้นของเหล็ก (%w/v)	% Fe ₂ O ₃	
	เคลือบครั้งที่ 1	เคลือบครั้งที่ 2
0 ^a	0.030	0.028
0.06	0.683	0.584
0.14	1.484	1.255
0.28	2.031	2.017
0.55	2.151	2.015
1.11	2.021	2.483

^a ซีลีกาเจลที่อบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และผ่านขั้นตอนการเคลือบทั้งหมด แต่ไม่มีการเติมเฟอร์ริกไนเตรต

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ % Fe_2O_3 ด้วยเครื่อง X – Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ของซีตาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์แบบที่ 1 (Modified Adsorption Method)

ความเข้มข้นของเหล็ก (%w/v)	% Fe_2O_3
0.69	2.357

ตารางที่ 11 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ

เวลา (นาที)	Adsorption Capacity (mg/g) ^a	
	ตะกั่ว	ทองแดง
0.5	– ^b	2.60 ± 0.05
1	– ^b	2.62 ± 0.05
2	– ^b	2.66 ± 0.07
3	– ^b	2.64 ± 0.05
4	– ^b	2.67 ± 0.05
5	9.06 ± 0.41	2.76 ± 0.03
10	9.29 ± 0.15	2.82 ± 0.06
15	9.61 ± 0.32	2.81 ± 0.02
20	9.86 ± 0.11	2.80 ± 0.07
30	9.84 ± 0.15	2.80 ± 0.10
45	9.85 ± 0.27	2.86 ± 0.05
60	9.88 ± 0.15	2.86 ± 0.03

ใช้สารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 49.83 mg/L ปริมาตร 25 mL, pH 5.39 ต่อตัวดูดซับ 0.1 กรัม

ใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 40.61 mg/L ปริมาตร 10 mL, pH 5.44 ต่อตัวดูดซับ 0.1 กรัม และใช้ทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 40.25 mg/L ปริมาตร 50 mL, pH 5.50 ต่อตัวดูดซับ 0.5 กรัม มาตรฐานที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 0.5 - 4 นาที

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3)

^b ไม่ได้มีการทำการทดลอง

ตารางที่ 12 ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของตะกั่ว (mg/L) ที่เตรียมได้	Adsorption Capacity (mg/g) ^a	% Removal ^a
4.19	0.95 ± 0.00	100.00 ± 0.00
9.71	2.21 ± 0.00	100.00 ± 0.00
19.36	4.40 ± 0.00	100.00 ± 0.00
28.65	6.51 ± 0.00	100.00 ± 0.00
37.95	7.99 ± 0.33	92.67 ± 0.00
50.77	8.93 ± 0.09	77.43 ± 1.44
58.46	8.86 ± 0.17	66.70 ± 0.41
69.04	8.81 ± 0.29	55.89 ± 0.74

ใช้สารละลายปริมาตร 25 mL ต่อน้ำหนักตัวดูดซับ 0.1 กรัม

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3)

ตารางที่ 13 ความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของทองแดง (mg/L) ที่เตรียมได้	Adsorption Capacity (mg/g) ^a	% Removal ^a
4.09	0.40 ± 0.00	100.00 ± 0.00
9.41	0.91 ± 0.00	100.00 ± 0.00
19.63	1.95 ± 0.04	98.96 ± 0.05
29.86	2.53 ± 0.14	85.84 ± 1.10
40.70	2.71 ± 0.10	69.35 ± 0.35
50.51	2.82 ± 0.06	56.14 ± 0.83
60.74	2.81 ± 0.12	45.90 ± 1.13
69.33	2.73 ± 0.09	39.43 ± 0.85

ใช้สารละลายปริมาตร 25 mL ต่อน้ำหนักตัวดูดซับ 0.25 กรัม

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3)

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและทองแดงในสารละลายที่พีเอชต่างๆ

pH ^c	ตะกั่ว(mg/L)		%Removal ^a ตะกั่ว	ทองแดง(mg/L)		%Removal ^a ทองแดง
	เริ่มต้น	ที่เหลือ ^b		เริ่มต้น	ที่เหลือ ^b	
3	50.74	46.08	9.18 ± 0.33	46.80	43.30	7.48 ± 1.28
5	45.22	10.54	76.69 ± 0.75	47.00	20.17	57.09 ± 0.49
5.5	47.88	8.34	82.51 ± 1.44	47.40	19.23	65.42 ± 0.49
6	46.69	5.15	88.98 ± 5.20	26.00	2.90	88.85 ± 2.31
7	44.49 ^d	0.34	99.23 ± 0.19	0.20 ^c	n.d.	100.00 ± 0.00
8	40.44 ^d	n.d.	100.00 ± 0.00	n.d.	n.d.	100.00 ± 0.01

ใช้สารละลายปริมาตร 25 mL ต่อน้ำหนักตัวดูดซับ 0.1 กรัมสำหรับตะกั่วและ 0.25 กรัม สำหรับทองแดง

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3), ^b ค่าเฉลี่ย (n=3), ^c pH ± 0.1

^d สารละลายตกตะกอน และเซนทริฟิวไม่ได้ (เมื่อเจือจางด้วยกรด HNO₃ 0.1 M ทำให้ตะกั่วที่ตกตะกอนอยู่ละลายออกมาในสารละลายและความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้จึงเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่เตรียมได้)

^c สารละลายตกตะกอน และเซนทริฟิวได้

n.d. (non detectable) ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง FAAS

ตารางที่ 15 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วและทองแดงในสารละลายที่มีเกลือ NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ

NaCl (M)	ตะกั่ว (mg/L)		Adsorption Capacity (mgPb/g) ^a	ทองแดง (mg/L)		Adsorption Capacity (mgCu/g) ^a
	เริ่มต้น	ที่เหลือ ^b		เริ่มต้น	ที่เหลือ ^b	
0	50.52	11.08	9.86 ± 0.25	40.95	12.81	2.81 ± 0.04
0.01	50.80	29.78	5.02 ± 0.17	41.38	21.67	1.87 ± 0.03
0.05	52.97	40.17	3.00 ± 0.28	41.38	32.34	0.86 ± 0.06
0.1	52.25	42.83	2.19 ± 0.16	42.01	36.31	0.54 ± 0.07
0.2	51.52	47.42	0.95 ± 0.10	42.22	38.19	0.37 ± 0.02

ใช้น้ำหนักตัวดูดซับ 0.1 กรัม ต่อสารปริมาตรละลายตะกั่ว 25 mL และปริมาตรสารละลายทองแดง 10 mL

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3)

^b ค่าเฉลี่ย (n=3)

วิธีการคำนวณ

$$\text{มวลโมเลกุลของ Fe} = 56$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ Fe}_2\text{O}_3 = 160$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ Fe(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = 404$$

1. ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (%w/v) จากน้ำหนักเฟอร์ริกไนเตรตที่ละลายอยู่ในน้ำ

ชั่งเฟอร์ริกไนเตรต $\text{Fe(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ X g ละลายในน้ำปริมาตร Y mL

$$\text{จากน้ำปริมาตร Y mL มีเหล็กอยู่} = \frac{56 \times X}{404} \text{ g}$$

$$\text{ถ้า น้ำปริมาตร 100 mL จะมีเหล็ก} = \frac{56 \times X \times 100}{404 \times Y} \text{ g (\%w/v)}$$

2. ปริมาณเหล็กที่พบจากตัวดูดซับเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

ผลการวิเคราะห์ % Fe_2O_3 ด้วยเครื่อง XRF จากน้ำหนักตัวดูดซับที่เตรียมจากซิลิกาเจล 5 g สามารถคำนวณเป็นน้ำหนักเหล็กต่อซิลิกาเจล 1g ได้ดังนี้

$$\text{จาก \% ของ Fe}_2\text{O}_3 \text{ คือน้ำหนักตัวดูดซับ 100 g มีน้ำหนักของ Fe}_2\text{O}_3 \text{ อยู่} = X \text{ g}$$

$$\text{ถ้าเตรียมจากตัวดูดซับ 5 g จะมีน้ำหนัก Fe}_2\text{O}_3 \text{ อยู่} = \frac{X \times 5}{100} \text{ g}$$

$$\text{ซิลิกาเจล 5 g มีเหล็ก (Fe)หนัก} = \frac{X \times 5 \times (2 \times 56)}{100 \times 160} \text{ g}$$

$$\text{ถ้า ซิลิกาเจล 1 g มีเหล็กหนัก} = \frac{X \times 5 \times 112 \times 1000}{100 \times 160 \times 5} \text{ mg/g silica gel}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเบญจวรรณ วงศ์ศิริ เกิดเมื่อวันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2522 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย