

การเตรียม และใช้กากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สำหรับกำจัดโลหะจากน้ำ



นายฐาปนพงศ์ พึ่งประสพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

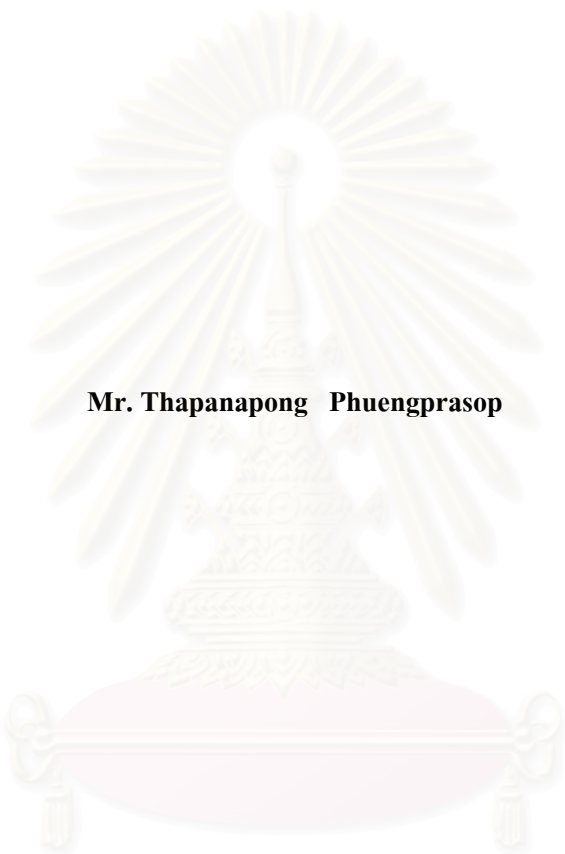
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PREPARATION AND USE OF IRON OXIDE-COATED SEWAGE SLUDGE
FOR METAL REMOVAL FROM WATER**



Mr. Thapanapong Phuengprasop

**สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University


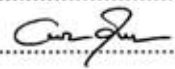
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

นายฐานพงษ์ พึ่งประสพ : การเตรียม และใช้กากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สำหรับกำจัดโลหะจากน้ำ (PREPARATION AND USE OF IRON OXIDE-COATED SEWAGE SLUDGE FOR METAL REMOVAL FROM WATER) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. เพ็ญฟ้า อุ๋นอบ; 101 หน้า.

เตรียมตัวดูดซับโลหะหนักจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ด้วยวิธี Modified Adsorption และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมตัวดูดซับ ได้แก่ ผลของอุณหภูมิในการอบกากตะกอนก่อนนำมาเคลือบ ค่าพีเอชของสารละลายเหล็กที่ใช้เคลือบ และระยะเวลาในการเคลือบ โดยวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวดูดซับจากกากตะกอนคือ นำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่อบที่ 300°C เป็นเวลา 3 ชม. มาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ พีเอช 12 ใช้เวลาในการเคลือบ 1 ชม. ซึ่งตัวดูดซับที่เตรียมได้มีลักษณะแบบอสังฐาน มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบ

ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และ ตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบกะ (batch) และวิเคราะห์หาปริมาณไอออนด้วยเทคนิค Flame atomic absorption spectrometry พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียม และนิกเกิลคือ พีเอช 7 และ พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงและตะกั่ว คือพีเอช 6 และพีเอช 5 ตามลำดับ ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับ คือที่ 1 ชม. การเติมเกลือโซเดียมไนเตรท แคลเซียมไนเตรท และโซเดียมซัลเฟต ที่มีความเข้มข้น 0.01 และ 0.50 โมลต่อลิตรลงในสารละลายโลหะจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับโลหะลดลง และสมดุลการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วเท่ากับ 17.3, 14.7, 7.8 และ 42.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสามารถกำจัดทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วในน้ำเสียจริงได้ 99.9, 96.7, 82.2 และ 100.0 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ตัวดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร และมีทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ผสมกันอยู่ในความเข้มข้นเริ่มต้น 19.9, 19.7, 19.5 และ 51.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากงานวิจัยพบว่ากากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีคุณสมบัติที่ดีในการที่ใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

สหสาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... 
 สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 
 ปีการศึกษา.....2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4589102720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: IRON-OXIDE COATED SEWAGE SLUDGE / ADSORPTION / HEAVY METALS

THAPANAPONG PHUENGPRASOP: PREPARATION AND USE OF IRON OXIDE-COATED SEWAGE SLUDGE FOR METAL REMOVAL FROM WATER. THESIS ADVISOR: FUANGFA UNOB, 101 pp.

An adsorbent for heavy metal ions was prepared using sewage sludge modified with iron-oxide. The modified adsorption method was used. The effect of sludge pretreatment temperature, pH of ferric solution and coating time were investigated. The adsorbents were prepared by using sludge pretreated at 300°C for 3 h coated with ferric solutions of pH 12. The coating time used was 1 h. The coated sludges were in amorphous form. Surface area, pore volume and iron content of the coated sludge were found to be higher than those of uncoated sludge.

The optimum conditions for removal of heavy metal ions (Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} and Pb^{2+}) from synthetic wastewater were studied using batch method. The concentrations of metal were determined by flame atomic absorption spectrometer (FAAS). The results showed that the pH suitable for adsorption of Cd^{2+} and Ni^{2+} was pH 7, Cu^{2+} and Pb^{2+} was pH 6 and pH 5, respectively. The contact time of 1 h. was used in adsorption experiments. The presence of NaNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and Na_2SO_4 in metal solution in the level of 0.01 M and 0.50 M could reduce the adsorption capacity of the iron oxide coated sludge. The adsorption isotherm of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} and Pb^{2+} were defined by the function of Langmuir. The maximum adsorption capacity for Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} and Pb^{2+} were 17.3, 14.7, 7.8 and 42.4 mg/g adsorbent, respectively. The removal efficiency of a mixed solution of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} and Pb^{2+} from real wastewater having initial concentration 19.9, 19.7, 19.5 and 51.5 mg/L, respectively using adsorbent dose of 10 g/L, was 99.9, 96.7, 82.2 and 100.0 %, respectively. The iron oxide coated sludge showed a potential as adsorbent for water treatment.

Inter-department...Environmental Science..... Student's signature..... *Th P.*
 Field of study.....Environmental Science..... Advisor's signature..... *Fuangfa Unob.*
 Academic year.....2007..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฟื่องฟ้า อุ่นอบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ จนมีผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังได้กรุณาให้ข้อคิดต่าง ๆ ในการทำงาน รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีให้ยึดถือปฏิบัติตาม อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อศิษย์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยตานนท์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ เป็นประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาสันต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสมวดี ไชยอนันต์สุจริต ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณศูนย์ส่งเสริมการวิจัยในภูมิภาคเอเชียของมูลนิธิเกาหลีเพื่อการศึกษา ขั้นสูง ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการวิจัย รวมทั้งขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วน และได้มอบทุนให้ไปศึกษาดูงาน และเสนอโครงการวิทยานิพนธ์ ณ ประเทศเวียดนาม

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ และสมาชิกหน่วยวิจัยการวิเคราะห์เชิงสภาวะแวดล้อม (Environmental Analysis Research Unit) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำในทุก ๆ เรื่อง รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ โรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง และ โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี ที่ได้อนุเคราะห์ภาคตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อเป็น วัตถุประสงค์สำหรับงานวิจัย

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัวรวมทั้งคุณพี่ระ วชิรวรรณวงศ์ ที่คอยให้กำลังใจให้คำปรึกษา ให้โอกาส และสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่าง อย่างดียิ่งเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.2 ทองแดง.....	4
2.2.1 ความเป็นพิษของทองแดง.....	5
2.3 แคดเมียม.....	6
2.3.1 ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	6
2.4 นิกเกิล.....	6
2.4.1 ความเป็นพิษของนิกเกิล.....	7
2.5 ตะกั่ว.....	7
2.5.1 ความเป็นพิษของตะกั่ว.....	7
2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	8
2.6.1 การตกตะกอนทางเคมี.....	9
2.6.2 กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน.....	9
2.6.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	9
2.6.4 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส.....	10
2.6.5 กระบวนการสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	10

2.6.6	กระบวนการระเหย.....	10
2.6.7	กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส.....	10
2.6.8	กระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์.....	11
2.6.9	กระบวนการดูดซับ.....	11
2.7	การดูดซับ.....	12
2.7.1	อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	12
2.7.2	กลไกการดูดซับ.....	13
2.7.3	สมดุลการดูดซับ.....	16
2.7.3.1	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	16
2.7.3.2	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช.....	17
2.7.3.3	ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที.....	18
2.7.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	20
2.8	การดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะ.....	22
2.8.1	กลไกในการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์.....	23
2.8.2	ประโยชน์จากกระบวนการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะ.....	24
2.9	เหล็กออกไซด์.....	25
2.9.1	คุณสมบัติของเหล็กออกไซด์.....	26
2.9.2	การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์.....	27
2.10	กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	29
2.10.1	ที่มาของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	29
2.10.2	การบำบัดกากตะกอน.....	30
2.10.3	องค์ประกอบของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	31
2.10.4	การจัดการและการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์.....	32
2.11	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	37
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	37
3.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	37
3.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	37
3.2.2	สารเคมี.....	38

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	39
3.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์...	39
3.3.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของ กากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	41
3.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะ ด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	43
3.3.4 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ.....	45
3.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะหนัก ของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง	45
3.3.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะระหว่างตัวดูดซับที่เตรียม จากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์กับตัวดูดซับที่นิยมใช้ทั่วไป.....	46
3.3.7 ศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออน ของโลหะผสม.....	46
3.3.8 ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะกับน้ำเสียจริงจาก ห้องปฏิบัติการ.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	49
4.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบด้วย เหล็กออกไซด์.....	49
4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของ กากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	56
4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะด้วยกากตะกอน เคลือบเหล็กออกไซด์.....	62
4.3.1 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ.....	62
4.3.2 ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกจากตัวดูดซับ ขณะทำการดูดซับ.....	63
4.3.3 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับ และสารละลายโลหะ.....	64
4.3.4 ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้และจลนศาสตร์การดูดซับ.....	66
4.3.5 ผลของไอออนรบกวน.....	75

4.4 ผลการศึกษาไอโซโทมของการดูดซับ.....	77
4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะจาก ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง.....	82
4.6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะระหว่าง ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์กับตัวดูดซับ ที่นิยมใช้ทั่วไป.....	83
4.7 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออน ของโลหะผสม.....	84
4.8 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริง.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัตถุอันตรายจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Hazardous Waste Industries).....	5
2.2 เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีกับการดูดซับทางกายภาพ.....	15
3.1 ตัวแปร และช่วงที่ทำการศึกษาในการเคลือบ.....	40
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะ และคุณสมบัติของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	42
4.1 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ระยะเวลาในการเคลือบ 0.5, 1, 2, 6 และ 24 ชั่วโมง.....	52
4.2 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ทำการอบก่อน นำไปเคลือบที่ 100 °C, 300 °C และ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ ไม่ได้อบ.....	54
4.3 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์.....	55
4.4 ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน ปริมาณเหล็ก และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในกาก ตะกอนที่ไม่เคลือบ และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	57
4.5 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-first order และ pseudo-second order ที่คำนวณจากสมการเส้นตรงของกราฟ.....	74
4.6 เปอร์เซนต์การดูดซับตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิลเมื่อมีเกลือต่าง ๆ ในสารละลาย.....	76
4.7 ข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล.....	80
4.8 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	81
4.9 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง.....	82
4.10 ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะโดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอน เคลือบเหล็กออกไซด์ เปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่นิยมใช้กันทั่วไป.....	83
4.11 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะผสมโดยใช้ กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร เป็นตัวดูด.....	84
4.12 ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะจากน้ำเสียจริง.....	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ.....	13
2.2 การดูดซับของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง.....	15
2.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	17
2.4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช.....	18
2.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบ BET.....	19
2.6 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่าง ๆ	20
2.7 ความสามารถในการละลายน้ำของไอออนของโลหะต่างๆ สำหรับ pH ต่างๆ.....	22
2.8 โครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ.....	23
2.9 การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์.....	27
2.10 การดูดซับแคตไอออน และแอนไอออนบริเวณผิวของไฮดรตเหล็ก.....	28
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมภาคก่อนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	39
4.1 ลักษณะของภาคตะกอนแห้งบดละเอียดสำหรับการทดลอง.....	49
4.2 ความสามารถในการดูดซับทองแดงด้วยภาคตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชของ สารละลายเหล็กเท่ากับ 1.73, 7.03 และ 12.02.....	50
4.3 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก.....	51
4.4 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของภาคตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ ไซเฟอร์ริคในเตรท 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 กรัม ในการเคลือบ.....	53
4.5 พื้นผิวของภาคตะกอนอบที่ 300°C และไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	59
4.6 พื้นผิวของภาคตะกอนอบที่ 300°C และเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	59
4.7 องค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวของภาคตะกอนที่ไม่ได้เคลือบเหล็กออกไซด์ และ ที่ เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	60
4.8 ผลของ mapping แสดงการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์บนผิวของภาคตะกอน ที่ไม่ได้เคลือบ และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	61
4.9 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วที่พีเอชต่าง ๆ.....	62
4.10 ปริมาณเหล็กที่ถูกชะออกจากตัวดูดซับ ขณะทำการดูดซับ โลหะที่พีเอชต่าง ๆ.....	64
4.11 ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่าง ๆ.....	65

4.12 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และ ระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที.....	67
4.13 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และ ระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที.....	67
4.14 ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และ ระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที.....	68
4.15 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และ ระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที.....	68
4.16 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของทองแดงที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	70
4.17 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของทองแดงที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	70
4.18 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของแคดเมียมที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	71
4.19 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของแคดเมียมที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	71
4.20 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของนิกเกิลที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	72
4.21 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของนิกเกิลที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	72
4.22 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของตะกั่วที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	73
4.23 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของตะกั่วที่ถูกดูดซับ โดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	73
4.24 สมดุลการดูดซับ โลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วของกากตะกอนเคลือบ เหล็กออกไซด์.....	77
4.25 สมดุลการดูดซับ โลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วจากน้ำตามแบบ จำลองแลงเมียร์.....	79

4.26 สมดุลการดูดซับโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วจากน้ำตามแบบ จำลองฟรอนด์ลิช.....	79
4.27 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะในน้ำเสียจริงโดยใช้กากตะกอนเคลือบ เหล็กออกไซด์ 0.01, 0.05 และ 0.10 กรัม เป็นตัวดูดซับ.....	85



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากจำนวนของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความต้องการเครื่องใช้อุปโภคบริโภคเพิ่มขึ้นตามด้วย และส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ มีการขยายตัวมากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมการผลิตสี อุตสาหกรรมชุบและเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหากไม่มีการบำบัดที่ดี ก็จะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาหลาย ๆ ด้าน ปัญหาที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งก็คือ ปัญหาการสะสมโลหะต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ เช่น พรอท ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล เป็นต้น โลหะเหล่านี้เมื่อเข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะวิธีการใด หากมีปริมาณมากเกินไปอาจทำให้สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นตาย หรือพิการได้ (เบญจวรรณวงศ์ศิริ, 2547) จึงจำเป็นต้องมีวิธีการกำจัดหรือบำบัดให้อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม วิธีการกำจัดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับ (Zhai และคณะ, 2004) เป็นต้น ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมและนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะไม่สูงมากนัก คือ วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง สามารถดูดซับได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์แต่มีราคาแพง จึงมีงานวิจัยที่หาตัวดูดซับที่มีราคาถูกมาใช้เป็นจำนวนมาก (Chen และคณะ, 2002) และในงานวิจัยนี้จะศึกษาการนำกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนมาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะด้วยการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนมีแนวโน้มเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามอัตราการขยายตัวของประชากร ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัด และกากตะกอนเหล่านี้มักถูกกำจัดโดยวิธีการเผา ฟังกลบ ทำปุ๋ย หรือนำไปถมพื้นที่ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ที่ไม่คุ้มค่า และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการรั่วไหลของสารพิษบางชนิดที่ปนเปื้อนมากับกากตะกอน (Yu และ Zhong, 2006; Otero และคณะ, 2003) ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาการนำกากตะกอนกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะในน้ำเสีย เนื่องจากในกากตะกอนประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ดี (Gasco และคณะ, 2005; Ros และคณะ, 2006) โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะนิยมนำกากตะกอนมาปรับปรุงพื้นผิวเป็นถ่านกัมมันต์ แต่ไม่มี

งานวิจัยฉบับนี้ที่รายงานถึงการนำกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียมาเคลือบด้วยออกไซด์ของโลหะ โดยเฉพาะเหล็กออกไซด์ซึ่งมีพื้นที่ผิว และประจุพื้นผิว (surface charge) อยู่มากซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะ อีกทั้งยังหาง่ายและราคาถูก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะประยุกต์ใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่ามากที่สุดโดยการนำมาเป็นตัวกลางเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อใช้กำจัดโลหะในน้ำเสียโดยจะศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับและภาวะที่เหมาะสมในการจับโลหะของตัวดูดซับที่เตรียมได้ เพื่อการประยุกต์กับน้ำเสียจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์

1.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์สำหรับกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วยวิธี Adsorption (เบญจวรรณ, 2547) โดยศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเคลือบ ดังนี้

- พีเอชของสารละลายเหล็กโดยศึกษาที่พีเอช 2 7 และ 12
- ระยะเวลาในการเคลือบศึกษาที่เวลา 0.5, 1, 3, 6 และ 24 ชม.
- ปริมาณของเฟอร์ริกไนเตรทที่ใช้เคลือบ 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 กรัม
- อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบด้วยเหล็ก

ออกไซด์โดยนำกากตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100°C 300°C และ 500°C เป็นเวลา 3 ชม.

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM/EDX) ศึกษาพื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค Surface Area Analyzer (BET) หาปริมาณเหล็กด้วยวิธี USEPA METHOD 3050B และหาองค์ประกอบทางเคมี (%C) ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer

1.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจาก ภาวะที่เหมาะสมในข้อ 1.3.1 โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

- พีเอชของสารละลายไอออนโลหะ และการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ โดยเลือกศึกษาในช่วงพีเอช 1-9
- ระยะเวลาในการสัมผัส ศึกษาที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที
- ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ 1, 5 และ 10 กรัมต่อลิตรของสารละลาย พร้อมทั้งศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ ณ เวลาต่าง ๆ
- ผลของไอออนรบกวน ได้แก่ โซเดียม แมกนีเซียม และแคลเซียมไอออน

1.3.4 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับไอออนของโลหะด้วยตัวดูดซับที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น

1.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะจากตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง และตัวดูดซับที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ Carbon Charcoal, Activated Carbon และตัวดูดซับที่เป็น Cation Resin

1.3.6 นำไปทดสอบกับน้ำเสียจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบภาวะในการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์และการนำไปใช้ดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียจากภาวะที่เหมาะสม

1.4.2 เป็นข้อมูลพื้นฐาน และเป็นแนวทางในการนำกากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ไปใช้สำหรับดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียจริง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ ตัวอย่าง เช่น ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย (trace metals) ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่ม ทรานสิชัน (transition elements) คุณสมบัติของโลหะหนักทางกายภาพที่มีความคล้ายคลึงกันคือ มีสภาพเป็นของแข็ง สามารถนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว และนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของโลหะหนัก คือ มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้สามารถรวมตัวกับสารอื่นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่า โลหะอิสระโดยเฉพาะการรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำ และดินตะกอน เนื่องจากมีความคงตัว ไม่สลายตัวโดยกระบวนการทางธรรมชาติ ทำให้บางส่วนสามารถสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้ สำหรับการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมนั้นส่วนมากเกิดจากการปลดปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และแพร่กระจายสู่แหล่งน้ำ ดิน อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร ผ่านไปตามห่วงโซ่อาหารจนกระทั่งเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต (สุชาดา สุทธิพิบูลย์, 2547)

2.2 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนมีเลขออกซิเดชัน +1, +2 และ +3 แต่โดยทั่วไปจะพบทองแดงที่มีเลขออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) เท่านั้น ซึ่งในสารละลายคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) จะเสถียรกว่าคิวปรัสไอออน (Cu^+) เนื่องจากคิวปรัสไอออนจะเกิดออกซิเดชันและรีดักชันได้ง่ายกว่า แต่ความเสถียรของ Cu^+ และ Cu^{2+} นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบหรือลิแกนด์ และค่าคงที่ในการละลาย ทองแดงละลายได้ดีในกรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก รวมทั้งสารละลายแอมโมเนียมไซยาไนด์ และโปตัสเซียมไซยาไนด์ โดยคิวปริกไอออนส่วนใหญ่จะละลายได้ในน้ำ คิวปริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) สามารถตกตะกอนเป็นตะกอนเบา หรือผลึกได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คิวปริกไฮดรอกไซด์อาจเปลี่ยนเป็นคิวปริกออกไซด์ (CuO) ซึ่งละลายได้ดีใน

กรดแก่ แต่บางครั้งอาจพบคิวปริกไอออนอยู่ในรูปคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ($\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) รวมทั้งทองแดงสามารถเกิดเป็นสารประกอบของ ซัลไฟด์ อาร์ซีไนต์ คลอไรด์ และคาร์บอเนตได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.1 ของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Hazardous Waste Industries) (Nemerow และ Dasgupta, 1991)

อุตสาหกรรม	วัตถุอันตราย
เหมืองแร่และถลุงแร่	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Se, Zn
สีและสีย้อม	Cd, Cr, Cu, Cn, Pb, Hg, Organics, Se
ยาม้าแมลง	As, Cl-hydrocarbons, Pb, Hg, Organics, Zn
เครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องอิเล็กทรอนิกส์	Cu, Cl-hydrocarbons, Pb, Hg, Se
โรงพิมพ์	As, Cr, Cu, Pb, Organics, Se
ชุบและเคลือบโลหะ	Cd, Cr, Cn, Zn
ผลิตสารเคมี	Cl-hydrocarbons, Cr, Cu Pb, Hg, Organics
วัตถุระเบิด	As, Cu, Pb, Hg
ยางและพลาสติก	Cl-hydrocarbons, Hg, Organics, Zn
แบตเตอรี่	Cd, Pb, Ag, Zn
ยา	As, Hg, Organics
สิ่งทอ	Cr, Cu, Organics
ปิโตรเลียมและถ่านหิน	As, Cl-hydrocarbons, Pb
กระดาษและเยื่อกระดาษ	Hg, Organics
หนังสือพิมพ์ ฟอกหนัง	Cr, Organics

2.2.1 ความเป็นพิษของทองแดง

หากร่างกายสะสมทองแดงไว้ในปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการจะส่งผลกระทบต่อ หรือก่อให้เกิดพิษได้ เช่น ทำให้เกิดการคลื่นเหียนอาเจียน ปวดท้อง เลือดออกในกระเพาะ ท้องร่วง หรือหากร่างกายได้รับในปริมาณที่มากจะทำให้เกิดโรคโลหิตจาง และทำให้เกิดโรควิลสัน โดยร่างกาย ผู้ป่วยจะสะสมทองแดงไว้ในตับมากกว่าปกติ เนื่องจากร่างกายไม่สามารถขับทองแดงออกทางท่อน้ำดีเข้าสู่ลำไส้ได้ และเมื่อตับมีทองแดงอิ่มตัว ทองแดงก็จะแทรกซึมเข้ากระแสเลือด

ทำให้ทองแดงไปสะสมอยู่ตามอวัยวะที่สำคัญต่าง ๆ เช่น สะสมอยู่ในไต สมอง และกระดูกตา ซึ่งอาจทำให้อวัยวะเหล่านี้พิการได้

2.3 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดอ่อน และละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) ละลายได้อย่างช้า ๆ ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ส่วนแคดเมียมที่ปรากฏอยู่ในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไอออนอิสระ (Cd^{2+}) หรือไฮดรอกไซด์ไอออน (CdOH^+) ในภาวะที่พีเอชต่ำกว่า 7 หรือ 8 ในแหล่งน้ำจืดอาจมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในรูปสารประกอบอื่น เช่น แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) และสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์ และแคดเมียมสามารถเกิดพันธะกับสารอื่น ๆ ในภาวะที่เป็นกรดอ่อนได้ เช่น สารซิสทีรีน (Cysteine) ในกรดอะมิโน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสม และไอออนบวกของโลหะชนิดอื่นที่สามารถเกิดสารประกอบได้เช่นเดียวกับแคดเมียม

2.3.1 ความเป็นพิษของแคดเมียม

หากได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มาก เช่น การหายใจเอาฝุ่นของแคดเมียมที่มีอยู่ปริมาณมากในบรรยากาศเข้าไป จะทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน เช่น เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ สูญเสียประสาทการดมกลิ่น ไอ เจ็บหน้าอก เหนื่อยออก สิ้น หรือถ้าเกิดจากการกินอาหารที่มีแคดเมียมปนอยู่จะเกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียน และท้องร่วงมีอาการเหมือนอาหารเป็นพิษได้ หากได้รับแคดเมียมในปริมาณน้อยเป็นประจำ ไม่ว่าจะเป็นการหายใจ กิน หรือดูดซึมเข้าทางผิวหนัง เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตจะไปทำลายปอด ทำให้เกิดปอดบวม ทำลายตับและไต เกิดเป็นนิ่วในไต ปัสสาวะลำบาก หรือปัสสาวะสีขาวขุ่นเนื่องจากไตถูกทำลาย อาการเรื้อรังของพิษจากแคดเมียม มีอาการเจ็บหัวเข่าและปวดตามกระดูกทั่วร่างกาย กระดูกจะเปราะแตกหักง่าย เกิดมะเร็งในไต ตับ ปอด อัณฑะ และต่อมลูกหมาก

2.4 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นแร่โลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความวาวคล้ายเงิน มีคุณสมบัติในการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าต่ำ แต่มีความทนทานต่อการสึกกร่อนและความร้อนสูง โดยปกติ นิกเกิลมีประจุ +2 ในสารประกอบสามารถมี oxidation states 4 ค่าคือ 0, +1, +2 และ +4 นิกเกิลเป็นโลหะที่พบกระจาย

ตามธรรมชาติทั่วไปบริเวณเปลือกโลก ในทะเลและมหาสมุทร รวมทั้งเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์

2.4.1 ความเป็นพิษของนิกเกิล

หากร่างกายได้รับนิกเกิลในระดับความเข้มข้นสูง ๆ อาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน โดยจะมีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ เจ็บหน้าอก ซึ่งเกิดอาการขึ้นภายใน 2-3 ชั่วโมง หลังจากเริ่มแสดงอาการแล้ว 12-23 ชั่วโมง หรือมากกว่า 5 วัน จะมีอาการของโรคเกี่ยวกับปอดอย่างรุนแรง หัวใจเต้นเร็ว อ่อนเพลียแล้วเสียชีวิตภายใน 4-13 วัน หากได้รับนิกเกิลความเข้มข้นต่ำบ่อย ๆ และได้รับเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดพิษเรื้อรัง ซึ่งเป็นอาการที่เกิดขึ้นจากร่างกายที่มีการสะสมนิกเกิลเป็นระยะเวลานานจนถึงระดับหนึ่งแล้วแสดงอาการเป็นพิษออกมา เช่น เนื้ออกในทางเดินหายใจ โรคในปอด สมอง ดับ และม้าม เป็นต้น

2.5 ตะกั่ว

ตะกั่วจัดเป็นโลหะที่มีความอ่อนตัวค่อนข้างสูง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในกรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ตะกั่วแสดงเลขออกซิเดชันได้หลายค่า แต่จะคงสภาพที่เสถียรในรูปของตะกั่ว $2+$ หรือ Pb^{2+} สำหรับสภาพการละลายนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ โดยทั่วไปพบว่าเกลือของตะกั่วไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่ละลายได้ในเบสเกิดเป็นพลัมไบต์ (plumbite: $Pb(OH)_4^{2-}$ ยกเว้นอะซิเตต และไนเตรทที่ละลายในน้ำได้เกิดเป็นไอออนของ Pb^{2+} ในรูปที่ถูกไฮเดรตหรือ $Pb^{2+}_{(aq)}$ ส่วนแร่ตะกั่วทั่วไปจะพบในรูปที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +4 โดยพบมากในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์รูปแบบต่าง ๆ ที่สำคัญได้แก่ ตะกั่วซัลไฟด์ หรือ กาลีนา (galena: PbS) ตะกั่วคาร์บอเนต หรือเซอร์ไรต์ (cerussite: $PbCO_3$) และตะกั่วซัลเฟต หรือ แองกลีไซต์ (anglesite: $PbSO_4$)

2.5.1 ความเป็นพิษของตะกั่ว

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งจากการหายใจ การกิน และทางผิวหนัง ขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปแบบของตะกั่วที่ได้รับ เช่น ตะกั่วอินทรีย์ ได้แก่ $Pb(C_{18}H_{35}O_2)_2$, $Pb(C_2H_5)_4$ และ $Pb(CH_3)_4$ ที่สามารถซึมผ่านผิวหนังได้เมื่อตะกั่วซึมเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ทำให้สามารถพบตะกั่วได้ในทุก ๆ ส่วนของร่างกาย ทั้งเนื้อเยื่ออ่อน ได้แก่ ไชกระดูก ระบบประสาท ไต และตับ เป็นต้น รวมทั้งเนื้อเยื่อแข็ง ได้แก่ กระดูก เส้นผม เล็บ และ

ฟัน เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะพบการสะสมของตะกั่วในกระดูกสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และร่างกายสะสมตะกั่วไว้ปริมาณหนึ่ง หรือได้รับในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ร่างกายจะแสดงอาการเจ็บป่วยออกมา เช่น ในระบบเลือดหากมีตะกั่วสูงกว่า 10 ไมโครกรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร อาจทำให้โลหิตจางเนื่องจากตะกั่วจะไปขัดขวางการสร้าง ฮีโมโกลบินและเม็ดเลือด หรือมีตะกั่วในเลือดเกินกว่า 16 ไมโครกรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร จะมีผลต่อระบบประสาทและกล้ามเนื้อทำให้เกิดอาการประสาทหลอน กระวนกระวาย อารมณ์แปรปรวน ชัก กล้ามเนื้ออ่อนแรง ตามัว และอาจรุนแรงถึงตาบอดได้ รวมทั้งมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ โดยเฉพาะผู้ที่ได้รับการสะสมติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้เป็นหมันได้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น โลหะหนักต่าง ๆ หากนำมาใช้อย่างถูกวิธีก็สามารถนำมาทำให้เกิดประโยชน์ได้มากมายหลายอย่าง แต่หากปล่อยให้ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ทั้งในน้ำ ดิน และอากาศ ก็จะส่งผลเสียตามมามากมายเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะหากปล่อยให้ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ พืชของโลหะเหล่านี้จะสะสมอยู่ในแหล่งน้ำ ในสัตว์น้ำรวมทั้งพืชน้ำด้วย ทำให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร หากมนุษย์ หรือสัตว์ ได้รับเข้าไปก็จะส่งผลกระทบต่อร่างกาย และหากได้รับเข้าไปในปริมาณที่มากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันถึงขั้นเสียชีวิตได้ ฉะนั้นก่อนปล่อยน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการบำบัดให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ซึ่งกระบวนการและวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่จะกล่าวในข้อต่อไป

2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการต่างๆ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกัน เช่น กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน หรือกระบวนการตกผลึกทางเคมีร่วมกับการเกิด โคลแอกกูเลชัน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้กระบวนการใด ๆ ควรต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมดังต่อไปนี้

- ลักษณะและคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด
- คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ใช้ในการบำบัด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัด และการตรวจสอบคุณภาพ
- ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย
- ความเป็นไปได้ในการกำจัดกากของเสียที่เหลือ หรือการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

2.6.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นการเปลี่ยนรูปจากโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง ด้วยกระบวนการทางเคมี เหนี่ยวนำให้เกิดภาวะอิ่มตัวเกินพอ (super saturation) ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ นิวเคลิเอชัน (nucleation) การเกิดผลึก (crystal growth) และการรวมตะกอน (flocculation) กระบวนการนี้จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไอออนของโลหะหนักที่ละลายในน้ำ เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมและน้ำบาดินที่ถูกปนเปื้อน และสามารถใช้ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียก่อนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษได้

สำหรับเทคนิคการตกตะกอนทางเคมีมีอยู่ 5 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation) คาร์บอเนต (carbonate precipitation) ซัลไฟด์ (sulfide precipitation) แซนธาต (xanthate precipitation) และการตกตะกอนแต่ละประเภทร่วมกัน (combined precipitation) แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์

2.6.2 กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)

เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ โดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมต และไนเตรท ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.6.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นการใส่เรซินเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนบรรจุภายในคอลัมน์ทรงกระบอกเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนกับสารปนเปื้อนในน้ำ เช่น แยก Cu^{2+} , CrO_4^{2-} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} ออกจากน้ำเป็นต้น นิยมใช้กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการตกตะกอนมาแล้ว ซึ่งเหลือค่าความสกปรกไม่มาก

2.6.4 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis: RO)

ระบบนี้อาจเรียกว่า ไฮเพอร์ฟิลเตรชัน (hyperfiltration) เป็นกระบวนการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยการกรองผ่านแผ่นเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semi-permeable membrane) ณ ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมติก (osmotic pressure) โดยแผ่นเยื่อนี้ทำจากสารเซลลูโลสอะซีเตต และพอลิเอไมด์ และจะยอมให้ตัวทำละลายผ่านได้เท่านั้น จึงเหลือเพียงสารที่ต้องการกำจัดที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพ แต่มีข้อจำกัดคือแผ่นเยื่อต้องสามารถทนต่อแรงดันสูงๆ ได้ และต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนด้วยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงและกรองสารแขวนลอยออกก่อน นอกจากนี้อาจมีปัญหาคาบของแผ่นเยื่อด้วย

2.6.5 กระบวนการสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปธาตุที่ขั้วแคโทด และจะเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง ๆ แต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงาน และไฟฟ้าสูง

2.6.6 กระบวนการระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีการง่ายๆ ที่ทำให้สามารถสารมีความเข้มข้นสูงขึ้นโดยการระเหยเอาน้ำออก ซึ่งมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้ภาวะสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีการนี้ใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.6.7 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับการใช้แผ่นเยื่อสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) ซึ่งกลไกการทำงานของระบบเป็นลักษณะของการแลกเปลี่ยนไอออน ร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยระบบประกอบด้วยขั้วเซลล์ประจุบวกและลบ และมีแผ่นเยื่อดังกล่าวที่ทำหน้าที่จับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวก แต่จะปล่อยให้สารที่มีประจุลบผ่านไป ความสามารถในการแยกไอออนออกจากสารละลายขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่

ไหลผ่านแผ่นเยื่อ สำหรับน้ำเสียก่อนที่จะส่งเข้าระบบจะต้องนำไปผ่านระบบที่สามารถกำจัดหรือแยกตะกอนเล็ก ๆ และสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเยื่อ ข้อดีของเทคนิคนี้คือ สามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการได้ แต่เป็นเทคนิคที่ต้องใช้ทุนในการก่อสร้างและดำเนินการสูง

2.6.8 กระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์ (Biological treatment)

เป็นการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก เช่น จากกระบวนการ Activated Sludge พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียมได้ ในเงื่อนไขที่มีความเข้มข้นของโลหะไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ศุภฤกษ์ สีนสุพรรณ, 2526)

2.6.9 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการกำจัดมลสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล มีตัวดูดซับหลายชนิดที่นิยมใช้ในระบบบำบัด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถ่านคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอท และเงิน ได้หมดและสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมรับได้ในน้ำดื่ม

กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่สามารถกระทำได้หลายวิธี และวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับก็เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำที่มีปริมาณโลหะปนเปื้อนในระดับต่ำ ง่ายต่อการดูแลรักษาและการจัดการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาวิธีการเตรียมดูดซับและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ด้วยวิธีการดูดซับเช่นเดียวกัน

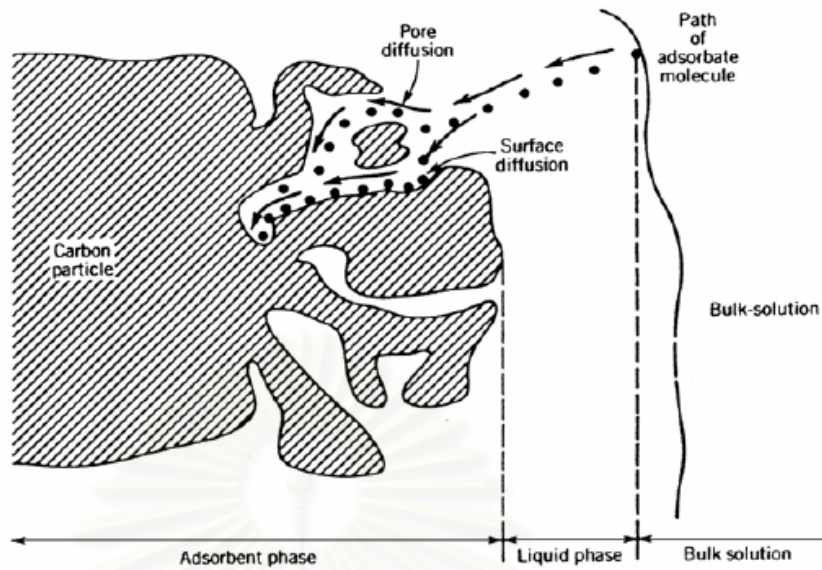
2.7 การดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 ภาวะใด ๆ เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น ซึ่งเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงอนุภาคของสารที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดอยู่บนผิว ลักษณะของการดูดติดผิวอาจเป็นได้ทั้งแบบกายภาพและแบบเคมี (physical and chemical adsorption) ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายอนุภาคสาร (mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังผิวของตัวดูดซับ อนุภาคของสารที่จะถูกดูดซับไว้ด้วยตัวดูดซับจะเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) (มานพ ตรีรัตน์สมโภช, 2545)

2.7.1 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ขั้นตอนในการดูดซับของสารโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของสารที่ละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นผิวหน้าของตัวดูดซับ (Surface transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ตัวดูดซับ การขนส่งในขั้นนี้เป็นกระบวนการที่เกิดการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลว (Surface diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลสารที่ละลายในชั้นของเหลวเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้สามารถจำกัดอัตราการดูดซับได้เช่นเดียวกัน ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Montgomery, 1985)

2.7.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นของของเหลวเคลื่อนที่เข้าไปใกล้และเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ และแรงดึงดูดที่ผิวของตัวดูดซับสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ ซึ่งการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

2.7.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attractive force) อย่างอ่อน ๆ ระหว่างโมเลกุล ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าของตัวดูดซับ วิธีการดูดซับทางกายภาพจะทำให้เกิดการดูดซับและซ้อนกันแบบหลาย ๆ ชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อนหน้า จำนวนชั้นของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ โดยจำนวนชั้นของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น การดูดซับทางกายภาพมักจะเป็นแบบไม่เฉพาะ (Nonspecific) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้จะไม่คัดเลือกเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนผิวหน้าของของแข็ง แต่จะเป็นอิสระในการ

เคลื่อนที่อยู่เหนือบริเวณผิวหน้านั้น โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นตรงกับค่าความแรงไอออน (Ionic strength) ของสารละลาย แต่มักจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ปะปนอยู่ในวัฏภาคของเหลว ทั้งนี้ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะสามารถผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยจะทำให้เกิดการปลดปล่อยหรือคายสารที่ถูกดูดซับออกมา (Desorption) ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

2.7.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ หรือแรงดึงดูดทางเคมีซึ่งเป็นแรงที่แข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และเป็นแรงที่ทำให้เกิดพันธะ ณ บริเวณเฉพาะ (Specific) ใด ๆ บนพื้นผิวของวัฏภาคของแข็ง เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี อาจเกิดการดูดซับได้ช้าและผันกลับไม่ได้ โดยทั่วไปสารที่ถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เหนือผิวหน้าของตัวดูดซับโดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจากบริเวณผิวหน้านั้นไปยังบริเวณอื่น เมื่อผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุล 1 ชั้นแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะลดลง จึงเกิดการผันกลับได้ยาก นอกจากจะมีการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิสูง ๆ แล้วสารที่ถูกดูดซับจึงจะแยกตัวออกมาจากตัวดูดซับได้ ทั้งนี้การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของพื้นผิวของของแข็ง ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย พีเอช และอุณหภูมิของสารละลาย (ฉันทิชา แพ่อ่อน, 2548)

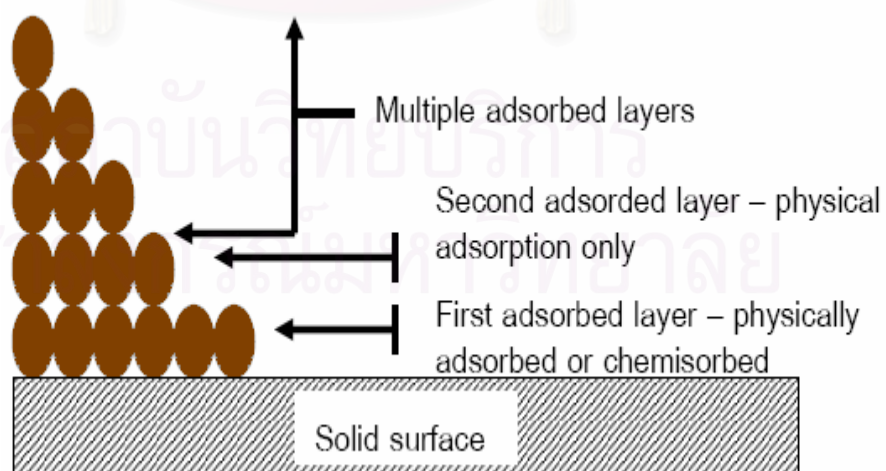
นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการดูดซับอีกประเภทหนึ่งคือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดซับที่บอกลักษณะด้วยการดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ โดยที่การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ก็ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของการดูดซับประเภทนี้เช่นกัน กล่าวคือ ไอออนของสารที่ถูกดูดซับซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณผิวหน้าเป็นผลมาจากการดึงดูดทางศักย์ไฟฟ้า (Electrostatic attraction) ซึ่งดึงดูดไอออนสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามที่อยู่บนผิวหน้าของตัวดูดซับ รวมทั้งไอออนของสารที่ถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุแบบเดียวกันซึ่งปะติดอยู่กับตัวดูดซับ โดยทั่วไปนั้น ไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น ไอออนแบบไตรวาเลนต์ (Trivalent ions) จะ ถูกดึงดูดสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามได้แรงกว่าไอออนที่มีประจุ

น้อยกว่า เช่น ไอออนแบบโมนอวาเลนต์ (Monovalent ions) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ นอกจากนี้ ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างการดูดซับทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมา แต่ก็ยังเป็นการยากที่จะตัดสินว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนตัวดูดซับใด ๆ จะมีการดูดซับแบบใดแบบหนึ่ง ที่กล่าวมาเกิดขึ้นเพียงแบบเดียวบนตัวดูดซับนั้น

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีกับการดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
คายพลังงาน 5-10 กิโลแคลอรีต่อโมล	คายพลังงาน 0.5-5 กิโลแคลอรีต่อโมล
เกิดสารประกอบทางเคมี	เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า
การหลุดออกยาก	การหลุดออกง่าย
ปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้	ปฏิกิริยาผันกลับได้

ในกระบวนการดูดซับ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดเข้ามาอยู่ในชั้นแรกจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับได้ จึงเกิดการดูดซับทั้งแบบกายภาพและเคมี ส่วนการดูดซับของโมเลกุลในชั้นต่อ ๆ ไป จะเกิดการดูดซับแบบกายภาพเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งรูปแบบของจำนวนชั้นของโมเลกุลที่ดูดซับแบบกายภาพ จะมีความสำคัญต่อการเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการดูดซับ หรือการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับ



รูปที่ 2.2 การดูดซับของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง (Myers, 1999)

2.7.3 สมดุลการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับ ตัวถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้ง ก่อนจะถูกดูดซับเข้าไปใหม่ จนเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการปลดปล่อยสารเข้าสู่ภาวะคงที่ ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับอีก เรียกว่าสมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium) หรือ เรียกสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิของระบบคงที่ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) โดยได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น แบบจำลองที่นิยมใช้ได้แก่

2.7.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแลงเมียร์ ดังสมการที่ (2.5) เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model ใช้อธิบายการดูดซับที่มีสมมติฐาน ดังนี้

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

$$q_e = \frac{(q_m b C_e)}{(1 + b C_e)} \quad (2.5)$$

โดย $q_e = q/m$ คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (q) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

q_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สามารถเกิดการดูดซับได้เพียงชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

b = ค่าคงที่ของพลังงานในระบบ

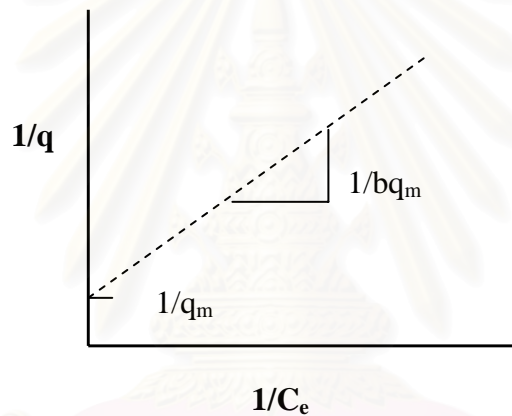
จากสมการที่ (2.5) เมื่อ q เข้าใกล้ q_m และ C_e เข้าสู่ ∞ (infinity) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{C_e}{q} = \left(\frac{1}{bq_m} \right) + \left(\frac{C_e}{q_m} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q กับ C_e จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $1/q_m$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bq_m$ และหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{C_e} \right) \left(\frac{1}{bq_m} \right) + \left(\frac{1}{q_m} \right) \quad (2.7)$$

และเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/bq_m$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.7.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟรุนด์ลิช ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ในระบบของเหลวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังสมการที่ 2.8

$$X = KC_e^{1/n} \quad (2.8)$$

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

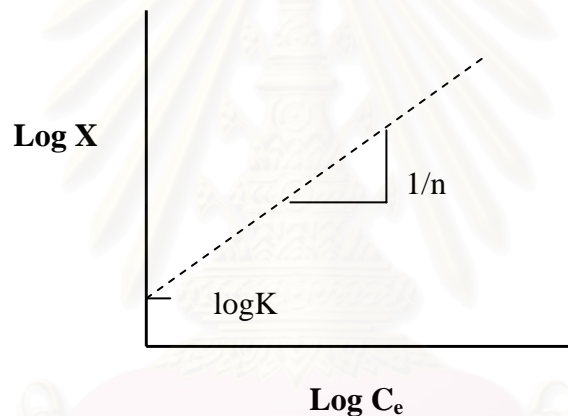
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ
 $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ (2.8) ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบเอกโปเนนเชียล (exponential) สามารถเขียนให้เป็นสมการเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของ logarithmic ได้ดังนี้

$$\text{Log} X = \text{Log} K + \left(\frac{1}{n}\right) \text{Log} C_e \quad (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\text{log} X$ กับ $\text{log} C_e$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/n$ และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $\text{log} K$



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

2.7.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที (BET, Brunauer Emmerett-Teller Adsorption Isotherm)

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาจาก Brunauer, Emmerett และ Teller เพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งพัฒนามาจากสมการของแลงเมียร์ โดยมีสมมติฐานว่า แต่ละโมเลกุลของการดูดซับในชั้นแรก จะเป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้น ต่อ ๆ ไป ดังสมการที่ (2.10) (Schroeder, 1977; Ngah และคณะ, 2004)

$$X = \frac{X_m b C_e}{(C_s - C_e)[1 + (b-1)(C_e / C_s)]} \quad (2.10)$$

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

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ต้องการสำหรับเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

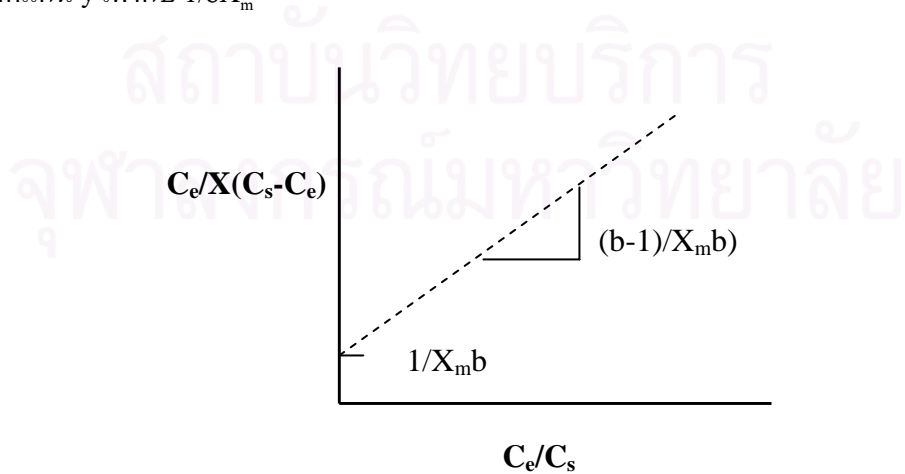
C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

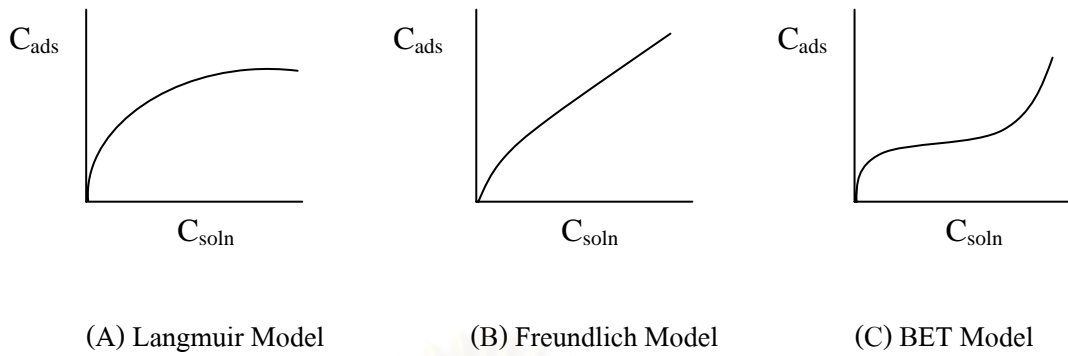
จากสมการที่ (2.10) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{X(C_s - C_e)} = \left(\frac{1}{bX_m} \right) + \left(\frac{b-1}{bX_m} \right) \left(\frac{C_e}{C_s} \right) \quad (2.11)$$

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 2.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบ BET



รูปที่ 2.6 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่าง ๆ เมื่อ C_{soln} คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย และ C_{ads} คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ

2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors influencing adsorption)

2.7.4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Size and surface area)

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมสามารถดูดโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.7.4.2 ความเร็วในการปั่นกวน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความเร็วในการปั่นกวนที่ใช้ในระบบ ถ้าน้ำถูกปั่นกวนด้วยอัตราเร็วต่ำจะส่งผลให้ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนา ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับที่เข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าปั่นกวนน้ำด้วยอัตราเร็วสูงน้ำมีความปั่นป่วนสูงจะทำให้ฟิล์มน้ำไม่อาจสะสมตัวรอบผิวตัวดูดซับจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงทำให้กรณีนี้ Pore Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.7.4.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

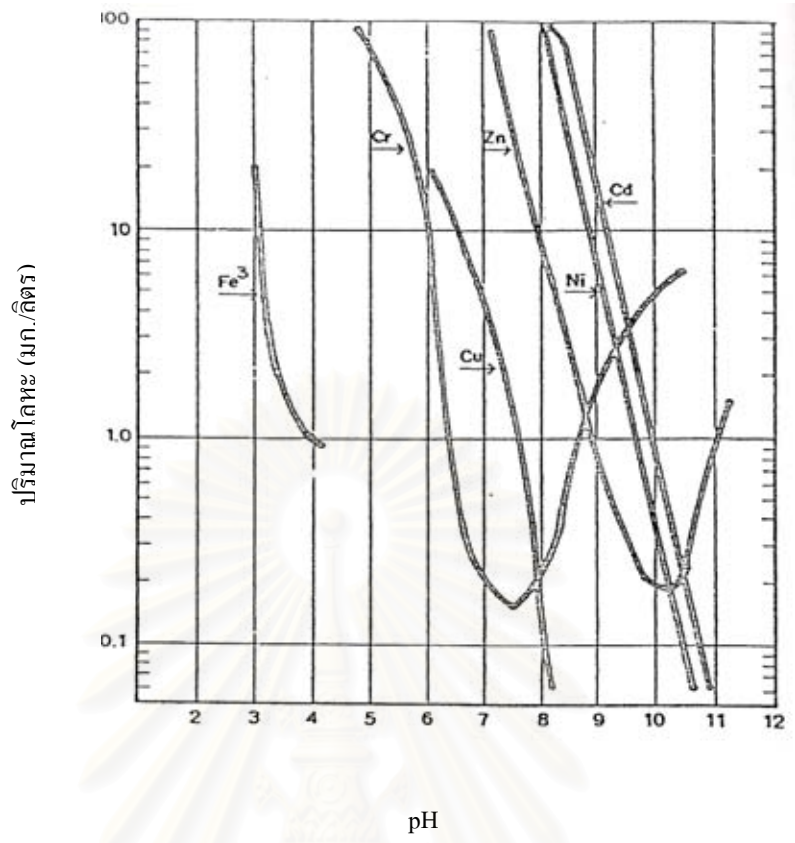
เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดกับผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมากสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไปทั้งนี้เพราะมีสารละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าเกิดมีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำ

2.7.4.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

จากการวิจัยพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อ โมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ มีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย (พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งโดยปกติโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงจะถูกดูดเข้าไป

2.7.4.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่า pH สูง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลของตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่เป็นสารละลายของไอออนในสารละลายมีค่า pH ต่ำ ๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีการแข่งขันกันระหว่างไอออนในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออนที่จะถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับ ซึ่งจะได้ผลในทางตรงกันข้ามกันเมื่อเป็นการดูดซับในสารละลายที่มีค่า pH สูง ๆ นอกจากนี้ค่า pH ยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่าง ๆ เช่น สารประกอบของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสามารถในการละลายน้ำของไอออนของโลหะต่างๆ สำหรับ pH ต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539)

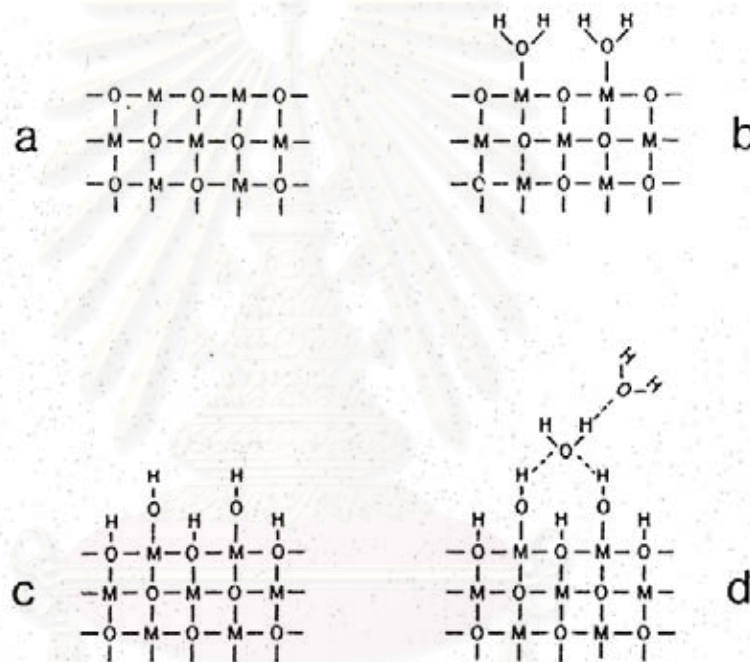
2.8 การดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะ

ไฮดรอกไซด์ของโลหะ (Hydrous metal oxide) คือ ของแข็งที่มีไอออนบวกของโลหะ ตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปเป็นส่วนประกอบ ซึ่งรวมอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังนั้นไฮดรอกไซด์ของโลหะจึงรวมไปถึงสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน ออกไซด์ (-O) ไฮดรอกไซด์ (-OH) และออกซิไฮดรอกไซด์ (-OOH) เนื่องจากเป็นสารซึ่งมีลักษณะทางเคมีของบริเวณผิวหน้าที่ถูกไฮเดรต (Hydrate) ได้ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย การดูดซับไอออนของโลหะด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในเวลาไม่กี่นาที่ การดูดซับบนผิวไฮดรอกไซด์ของโลหะจะเกิดได้ดีหรือไม่จะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและเคมีของแร่ธาตุที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์นั้น ๆ สมบัติเหล่านี้จะรวมไปถึงส่วนประกอบทางเคมี รูปร่างลักษณะของสาร ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวสัมผัส และความพรุน นอกจากนี้ การดูดซับไอออนต่าง ๆ บนไฮดรอกไซด์ยังขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายด้วย โดยการดูดซับไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นตามระดับพีเอชที่สูงขึ้น ในทางกลับกันการดูดซับไอออนลบจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอชของสารละลายต่ำ ๆ ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนต่าง ๆ บนไฮดรอกไซด์ของ

โลหะ เช่น ความแรงของไอออนของสารละลาย (Ionic strength) ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ และไอออนอื่น ๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายซึ่งจะเข้ามาเป็น ตัวแข่งขันในการดูดซับบนผิวไฮดรอกไซด์ออกไซด์ของโลหะ (อัจฉรีย์ กาญจนพิบูลวงศ์, 2544)

2.8.1 กลไกในการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์ออกไซด์

เมื่อออกไซด์ของโลหะสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่ผิวของโลหะออกไซด์ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงโครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ (Dzombak and Morel, 1990)

จากรูปที่ 2.8 ในขั้นแรกไอออนของโลหะในชั้นผิวหน้าของออกไซด์ที่ยังไม่มีโมเลกุลของน้ำเข้าไปจับ (รูป a) เมื่อโมเลกุลของน้ำเข้าไปล้อมรอบจะเกิดการสร้างพันธะ coordinate ระหว่างไอออนของโลหะกับโมเลกุลของน้ำจะทำให้ผิวหน้ากลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (รูป b) จากนั้นโปรตอน (H^+) ก็จะหลุดและแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำมาจับกับออกไซด์ของโลหะ (รูป c) โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของโลหะออกไซด์สามารถดูดซับ โมเลกุลของน้ำเข้าไปเพิ่มเติมได้อีก (รูป d) (Dzombak and Morel, 1990)

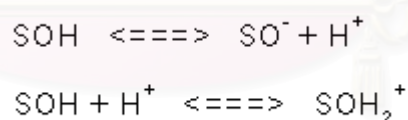
ไฮดรอกไซด์ของโลหะจะแสดงพฤติกรรมแบบที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (Amphoteric) ในน้ำ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของออกไซด์สามารถจะยึดหรือปล่อยโปรตอนได้ และทำให้พื้นผิวของออกไซด์มีประจุได้ ความเป็นกรดของพื้นผิวเป็นสมบัติที่สำคัญของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีการมีหมู่ฟังก์ชันที่ผิวจะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับชนิดและขอบเขตของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนที่มีการเชื่อมต่อของผิว (Interfacial reaction) เช่น ปฏิกิริยาการดูดซับและการจับตัวเป็นก้อน บริเวณซึ่งเป็นกรดบนพื้นผิวแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. บริเวณที่เป็นกรดแบบลิวอิส (Lewis acid site) เป็นบริเวณที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เช่น บริเวณที่เป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ซึ่งอยู่ในขอบของผลึก

2. บริเวณที่เป็นกรดแบบบรอนสเตด (Bronsted acid site) เป็นบริเวณที่ให้โปรตอน เช่น $Si-OH$, $Fe-OH$, $Al-OH$ หรือ H_3O^+

หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งกรดและเบสดังที่กล่าวมา สามารถเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้เช่นเดียวกับลิแกนด์อื่น ๆ ของสารละลาย ปฏิกิริยากรด-เบสที่เกิดขึ้นบนผิวของออกไซด์ของโลหะจะสามารถอธิบายถึงลักษณะได้จากการได้รับหรือสูญเสียโปรตอนมากกว่าที่จะอธิบายด้วยการแลกเปลี่ยนไฮดรอกซิลไอออน

ปฏิกิริยาที่ใช้อธิบาย คือ



โดยที่ SOH คือ หมู่ไฮดรอกซิลทั่วไปบนผิวของออกไซด์ของโลหะหลังจากสัมผัสกับน้ำ

2.8.2 ประโยชน์จากกระบวนการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์ของโลหะ

การศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางเคมีของไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก โดยมีการศึกษาทดลองเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย ดังนี้

ด้านวิศวกรรม เช่น การแยกแร่ การบำบัดน้ำเสีย และการผสมโลหะ

ด้านการแพทย์ เช่น การใช้ในทางเภสัชกรรมเพื่อทำยาแก้ท้องเพื่อ

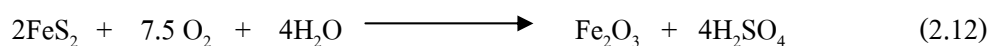
ด้านวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม มีการศึกษาด้านต่าง ๆ คือ

- ดิน : การกักประจุลบ มลพิษทางดินที่เกิดจากโลหะหนัก ความเป็นกรดของดิน เสถียรภาพของดิน เป็นต้น
- แม่น้ำ : การสำรวจด้านเคมีทางธรณีวิทยาของแม่น้ำ การเคลื่อนย้ายของสารอาหาร และของเสียต่าง ๆ จากการดูดซับ เป็นต้น
- ทะเลสาบ : การกักและปลดปล่อยสารอาหารในทะเลสาบ การฟื้นฟูสภาพของทะเลสาบ เป็นต้น
- มหาสมุทร : ศึกษาอัตราการเกิดตะกอนของมหาสมุทร การดูดซับโลหะที่เป็นจุลธาตุในมหาสมุทร เป็นต้น

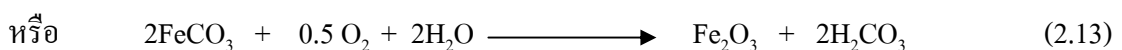
จากสมบัติและความสามารถในการดูดซับของโลหะออกไซด์ดังกล่าว ทำให้โลหะออกไซด์เป็นที่น่าสนใจ ที่จะนำมาทำเป็นตัวดูดซับเพื่อใช้บำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งโลหะออกไซด์ที่พบทั่วไปมีหลายชนิด เช่น แมงกานีสออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เหล็กออกไซด์มาประยุกต์ใช้สำหรับดูดซับโลหะหนักออกจากรน้ำ

2.9 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxides)

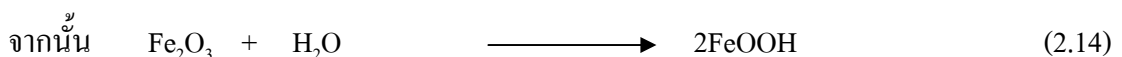
เหล็กออกไซด์ มีอยู่ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนที่เกาะอยู่กับเหล็ก โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe^{2+}) มีสีเขียวเทา หรือน้ำเงิน และในรูปของสารประกอบเฟอร์ริก (Fe^{3+}) มีสีเหลือง แดง หรือน้ำตาล ในดินส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสินแร่ที่เรียกว่าฮีมาไทต์ (hematite, Fe_2O_3) และเกอร์ไทต์ (goethite, $FeOOH$) ซึ่งมีสีเหลืองส้ม โดยเกอร์ไทต์เกิดมาจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไพไรต์ (pyrite) และซิเดอไรต์ (siderite) โดยอาศัยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดออกซิเดชันจาก Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ดังสมการที่ (2.12) ถึง (2.14)



Pyrite Hematite



Sederite Hematite



Hematite Goethite

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในธรรมชาติโดยสารประกอบของเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดิน และส่งผลอย่างมากกับสีของดินที่ปรากฏ

ส่วนเหล็กที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติมีได้หลายรูปแบบ ได้แก่ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเป็นไอออนอิสระที่สามารถสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลต่าง ๆ ในน้ำได้ และปรากฏอยู่ในรูปของไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (hydrate ion) หรือ $Fe(H_2O)_x^{n+}$ โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับว่าเป็นเหล็กที่อยู่ในรูป (species)ใด ตัวอย่างเช่น



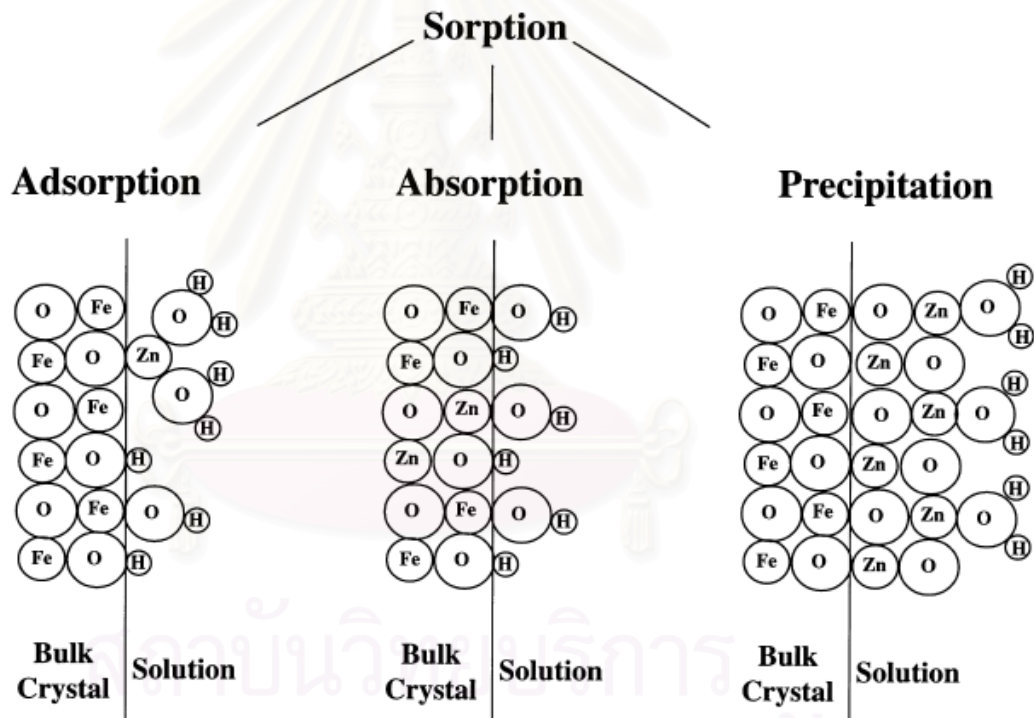
รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาได้กับแอนไอออนของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (metal complex) หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (organometallic compound) ได้อีกด้วย

2.9.1 คุณสมบัติของเหล็กออกไซด์

เหล็กออกไซด์มีประจุบนพื้นผิวจำนวนมาก ทำให้สามารถจับกับสารต่าง ๆ ที่มีประจุได้ดี เช่น โลหะหนัก และสารอินทรีย์ต่าง ๆ แต่เนื่องจากเหล็กออกไซด์ฟุ้งกระจายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ และกรองออกจากรูน้ำได้ยาก และนอกจากนี้ยังเป็นสื่อให้น้ำผ่านได้ยาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำเหล็กออกไซด์มาทำเป็นตัวดูดซับโดยตรง ดังนั้นจึงนิยมนำเหล็กออกไซด์มาเคลือบบนตัวรองรับหลายประเภทที่เฉื่อย (Inert) และ กระจายตัวได้ดีในน้ำ เช่น ทราย ซิลิกาเจล และถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

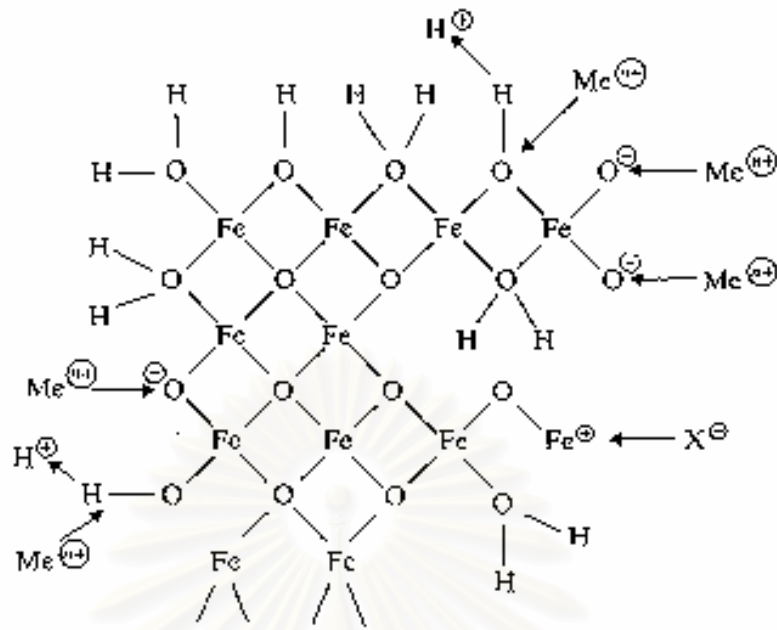
2.9.2 การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์

การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อออกไซด์ของเหล็กสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่บริเวณพื้นผิว โดยเหล็กออกไซด์จะแสดงพฤติกรรมที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (amphoteric) กล่าวคือ สามารถรับอิเล็กตรอนหรือรับโปรตรอนก็ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะจึงมีได้หลายแบบ เรียกโดยรวมว่า sorption ซึ่งมีทั้งการดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (precipitation) ซึ่งการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดเพียงกระบวนการเดียว สองกระบวนการ หรือทั้งหมดรวมกันดังรูปที่ 2.9 โดยในการศึกษานี้สนใจ และกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์

(Koretsky, 2000)



X^{-} คือ แอนไอออน เช่น PO_4^{3-}
 Me^{n+} คือ แคทไอออน เช่น Cu^{2+}, Zn^{2+}

รูปที่ 2.10 การดูดซับแคทไอออน และแอนไอออนบริเวณผิวของไฮดรอกไซด์เหล็ก (III) ออกไซด์ (O'Neill, 1993)

สารประกอบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้ดี เนื่องจากมีประจุบนพื้นผิว จึงสามารถดูดซับกับไอออนของโลหะ รวมทั้งสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดี แต่การนำเหล็กออกไซด์มาใช้กำจัดโลหะโดยตรงนั้นจะใช้ในรูปแบบของสารแขวนลอย หรือเจลของไฮดรอกไซด์ ซึ่งการแยกของแข็งออกจากน้ำทำได้ยาก ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำมากำจัดโลหะสำหรับใช้งานจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเหล็กออกไซด์มาเคลือบลงบนผิวดักกลางที่เป็นของแข็ง โดยเลือกใช้กาทะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาเป็นสารรองรับ (Solid support) เนื่องจากกาทะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งมีทั้งคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำมาปรับปรุงพื้นผิวและใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับโลหะหนักได้เป็นอย่างดี

2.10 กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการทางชีวภาพจะมีกากตะกอนจุลินทรีย์หรือสลัดจ์เป็นผลผลิตตามมาด้วยเสมอ ซึ่งเป็นผลจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการกินสารอินทรีย์ในน้ำเสีย กากตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีสภาพไม่คงตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดกากตะกอนเหล่านั้นเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการเน่าเหม็นของกากตะกอน การเพิ่มภาวะมลพิษ และเป็นการทำลายเชื้อโรคด้วย นอกจากนี้การลดปริมาตรของกากตะกอนโดยการกำจัดน้ำออกจากกากตะกอน ช่วยให้เกิดความสะดวกในการเก็บขนไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ

2.10.1 ที่มาของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียที่มาจากแหล่งชุมชนจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ และในกระบวนการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะโดยวิธีการใดย่อมมีกากตะกอนเกิดขึ้นเสมอ โดยเฉพาะระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการทางชีวภาพ และโดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียชุมชน แบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้คือ

1. ขั้นตอนเตรียมการก่อนบำบัด เป็นขั้นตอนที่ต้องการตัดแปรหรือปรับปรุงสภาพน้ำทิ้งให้เหมาะสมกับการบำบัดในลำดับต่อไป อาศัยกระบวนการทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่ คือ แยกสิ่งแขวนลอยขนาดใหญ่ เช่น ขยะขนาดใหญ่ โดยอาศัยตะแกรงกักเอาไว้ คูม้อัตราการไหลให้มีอัตราค่อนข้างสม่ำเสมอ และแยกน้ำมันหรือไขมันออกจากน้ำ สำหรับในขั้นแรกนี้ยังไม่มีการเกิดตะกอนขึ้นจะมีเพียงสิ่งแขวนลอยขนาดใหญ่ที่ถูกแยกออกมา

2. การบำบัดขั้นต้น เป็นการแยกของแข็งส่วนที่ตกตะกอนออกจากน้ำ โดยอาศัยการตกตะกอน โดยแรงโน้มถ่วงในถังตกตะกอน และการบำบัดขั้นต้นนี้มีจุดประสงค์ให้สารส่วนที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ ตกตะกอนในถังตกตะกอนขั้นต้น สำหรับสารส่วนที่จุลินทรีย์ย่อยสลายไม่ได้ ได้แก่ วัตถุประเภททอวด ทราย หิน เมล็ดผลไม้ เศษกระดูกจะถูกแยกให้ตกตะกอนในถังอีกใบหนึ่ง ในส่วนที่เป็นน้ำเสียจะถูกส่งไปยังถังบำบัดขั้นที่สองต่อไป การบำบัดในขั้นนี้อาจอาศัยกระบวนการทางเคมีแทน เช่น การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การสังเคราะห์แกนตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารที่มีขนาดเล็กมากหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำ และไม่สามารถตกตะกอนได้ ถูกทำให้พื้นผิวมีประจุเป็นกลางโดยอาศัยสารเคมี และเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนเบาเล็ก ๆ ซึ่งสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนสามารถตกตะกอนโดยน้ำหนักของตัวเอง

3. การบำบัดขั้นที่สอง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นยังมีสิ่งเจือปนที่เป็นสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ (Soluble organics) จึงจำเป็นต้องกำจัดสารอินทรีย์เหล่านั้น โดยวิธีต่างๆ และวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับน้ำเสียที่ไม่มีความเป็นพิษ คือ การบำบัดทางชีวภาพ นั่นคือการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ โดยจุลินทรีย์ดังกล่าวจะเปลี่ยนสารละลายอินทรีย์ให้กลายเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์ และเมื่อบำบัดเสร็จแล้ว จะแยกเซลล์เหล่านั้นออกจากน้ำโดยการตกตะกอนในถังตกตะกอนขั้นที่สอง ระบบบำบัดทางชีวภาพที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ ระบบเลี้ยงตะกอน (Activated Sludge) ระบบลานกรอง (Trickling Filters หรือ Biofilter) ระบบคลองวงเวียน (Oxidation Ditch) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoons) และระบบบ่อคงตัว (Stabilization Ponds)

4. การบำบัดขั้นสุดท้าย โดยทั่วไปถือว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้วจะมีค่าความสกปรกต่ำ และสามารถปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำได้ การบำบัดในขั้นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นการกำจัดอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ เช่น ฟีนอล คีโตนอร์เจนต์ สารเร่งการเจริญเติบโตของพืชน้ำ เช่น ไนเตรท ฟอสเฟต คลอโรเจนสี โลหะต่างๆ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ที่ก่อให้เกิดความขุ่น

กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียมักเกิดขึ้นจากขั้นตอนการบำบัดขั้นต้นและการบำบัดขั้นที่สอง และจะต้องนำมาบำบัดต่อไป เพราะถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดมลภาวะถ้าไม่ผ่านการบำบัดก่อนนำไปทิ้ง เพราะกากตะกอนเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นตะกอนอินทรีย์ (Organic Sludge) ที่ได้จากถังตกตะกอนขั้นต้น และขั้นที่สองซึ่งยังมีสภาพไม่คงตัว

2.10.2 การบำบัดกากตะกอน

การบำบัดกากตะกอน มีขั้นตอนหลักอยู่ 2 ขั้นตอน (ปีทมมพร ยอดสันติ, 2543) คือ

1. ลดส่วนที่เป็นน้ำที่มีอยู่ในกากตะกอน (Water Content) เพื่อให้กากตะกอนมีความหนาแน่นมากขึ้น ถ้าทำการลดส่วนที่เป็นน้ำก่อนการนำกากตะกอนเข้าสู่กระบวนการบำบัด เรียกว่า Concentration หรือ Thickening แต่ถ้าทำการลดส่วนที่เป็นน้ำหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดตะกอนแล้ว เรียกว่า Dewatering สาเหตุที่จำเป็นต้องทำการลดส่วนที่เป็นน้ำ ได้แก่

- 1) เมื่อกากตะกอนมีน้ำลดน้อยลง ปริมาตรของกากตะกอนจะน้อยลงด้วย จึงทำให้สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งกากตะกอนเพื่อนำไปกำจัด
- 2) ในงานตัดกวาดหรือเคลื่อนย้ายกากตะกอนที่มีปริมาณน้ำน้อย จะดำเนินการได้ง่ายกว่ากากตะกอนที่มีปริมาณน้ำมากกว่า
- 3) กากตะกอนที่จะนำเข้าเตาเผา ควรที่จะมีปริมาณน้ำน้อยที่สุดในกากตะกอน ทั้งนี้เพื่อลดการใช้พลังงานในการเผา
- 4) ในการหมักทำปุ๋ย ควรที่จะเตรียมกากตะกอนให้มีลักษณะค่อนข้างแห้ง ซึ่งจะเหมาะสมกับการนำไปกองเพื่อทำการหมักทำปุ๋ยต่อไป
- 5) กากตะกอนที่มีปริมาณน้ำน้อยจะมีกลิ่นน้อยกว่า กากตะกอนที่เปียก
- 6) กากตะกอนที่จะนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล ถ้าเป็นกากตะกอนที่ค่อนข้างแห้งอยู่แล้วจะเกิดปัญหาน้ำในกากตะกอนซึมลงใต้ดินน้อยลง

2. เปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์ของกากตะกอนให้อยู่ในภาวะคงตัว (Stabilization) คือ ได้องค์ประกอบที่ไม่มีการย่อยสลายอีกต่อไป โดยอาศัยวิธีการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Digestion) ซึ่งใช้กันเป็นส่วนใหญ่ และการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

2.10.3 องค์ประกอบของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน

ลักษณะทางกายภาพของกากตะกอนอยู่ในรูปกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-Solids) มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ หากยังอยู่ในรูปที่ไม่คงตัวจะมีกลิ่นเหม็น มีแก๊สและความร้อนจากการย่อยสลายกากตะกอนของจุลินทรีย์ องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจะขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเสีย โดยองค์ประกอบบางอย่างก็สามารถถูกกำจัดไปได้หมด หรือบางครั้งอาจมีความเข้มข้นในกากตะกอนสูงกว่าในน้ำเสียก็ได้

องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน นอกจากขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเสียแล้วยังขึ้นกับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และกระบวนการบำบัดกากตะกอน ซึ่งโดยทั่วไปองค์ประกอบของกากตะกอนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม (ศิริณี ศิริสุโขดม, 2535) คือ

1. ธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม และจุลธาตุอาหารพืช ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี
2. โลหะหนัก สารอินทรีย์เคมี จุลินทรีย์ และหนอนพยาธิต่าง ๆ

2.10.4 การจัดการและการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์

กากตะกอนที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนัก และเกลือของโลหะต่างๆ จะมีทั้งที่เป็นประโยชน์และโทษต่อระบบนิเวศน์หากนำไปถมพื้นที่ ในด้านที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ สามารถปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น หากในกากตะกอนนั้นมีแร่ธาตุที่เป็นอาหารของพืช ส่วนในด้านที่เป็นโทษ คือ กากตะกอนที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก จะก่อให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในดิน และจะแพร่กระจายสู่ระบบนิเวศน์ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดและการจัดการที่ดีเพื่อป้องกันการเกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม การจัดการกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดแล้วมีหลายรูปแบบ ได้แก่

1. การนำไปทิ้งบนพื้นดิน (Land dumping)
2. นำไปถมพื้นที่โดยตะกอนอยู่ในรูปตะกอนแข็ง (landfill)
3. การเผา (incineration)
4. การหมักทำปุ๋ย (composting)

โดยการจะเลือกวิธีการจัดการแบบใดต้องคำนึงถึง องค์ประกอบของกากตะกอน ความสมดุลของระบบนิเวศน์ ผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม รวมถึงค่าใช้จ่าย ความเหมาะสมในแต่ละประเทศ และที่สำคัญที่สุดต้องคำนึงถึงความปลอดภัย และการยอมรับของประชาชน

วิธีการกำจัดกากตะกอนโดยการเผา เป็นวิธีที่มีความสะดวกในการจัดการ แต่มีต้นทุนในการจัดการสูง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ดังนั้นหากมีวิธีการอื่นที่สามารถทดแทนวิธีการเผาได้ แล้วไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษตามมาภายหลังก็น่าจะเป็นวิธีการที่ดี ยกตัวอย่างเช่น การนำกากตะกอนมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยนำมาปรับปรุง หรือคัดแปรให้เป็นตัวดูดซับเพื่อนำไปใช้ดูดซับโลหะในน้ำเสียซึ่งถือได้ว่าเป็นการช่วยลดปัญหามลพิษได้อีกทางหนึ่ง

2.11 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อปรับปรุงพื้นผิว และใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับโลหะได้เป็นอย่างดี โดยได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่พยายามนำกากตะกอนมาใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับโลหะหนักและมลสารอื่น ๆ ในน้ำ เช่นงานวิจัยต่อไปนี้

Calvo และคณะ(2001) ศึกษาการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตอาหารทางการเกษตร มาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน คือ ทำกากตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และนำกากตะกอนมาคัดแปรให้เป็นถ่านกัมมันต์ และศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับโดยใช้เมทิลลีนบลูเป็นตัวถูกดูดซับ พบว่าการเตรียมตัวดูดซับโดยทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าที่นำมาคัดแปรเป็นถ่านกัมมันต์ ในขณะที่ Chen และคณะ (2002) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของถ่านกัมมันต์ที่คัดแปรจากกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่ากากตะกอนที่ถูกคัดแปรเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้น พบว่า สามารถดูดซับฟีนอลและคาร์บอนเตตระคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี Zhai และคณะ (2004) ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิล ของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น พีเอชของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้น และระยะเวลาในการสัมผัส พบว่าสามารถดูดซับไอออนของแคดเมียม และนิกเกิลได้ดีที่ พีเอช 5.5-6.0 ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตัวดูดซับไม่น้อยกว่า 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

นอกจากนี้ Zhang และคณะ (2005) ได้ศึกษาการบำบัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริกและซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์สามารถดูดซับปรอทได้ดีที่สุด และพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของปรอท ระยะเวลาในการสัมผัส และระดับพีเอชให้สูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็เพิ่มขึ้นด้วย และ Rozada และคณะ (2005) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอน และเศษยางรถยนต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด Casco และคณะ (2005) ได้ศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับจากกากตะกอนให้เป็นคาร์บอนโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อใช้ดูดซับโซเดียม โปแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ จากการศึกษพบว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้สามารถดูดซับไอออนทั้งสี่ชนิดได้ดี โดย

สามารถดูดซับไอออนของโซเดียมได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามยังไม่มีการวิจัยฉบับใดที่รายงานการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับโดยนำมาเคลือบด้วยออกไซด์ของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กออกไซด์

จากการศึกษาพบว่าสารประกอบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้ดีเนื่องจากมีประจุบนพื้นผิวอยู่มาก จึงสามารถดูดซับกับโลหะ รวมทั้งสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดี จึงได้มีการนำเหล็กออกไซด์มาใช้เป็นตัวดูดซับดังเช่นในงานวิจัยของ Choo และ Kang (2003) ที่ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ และได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ชนิดของเหล็กออกไซด์ และระดับพีเอชของน้ำเสีย พบว่า ferrihydrite มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์สูงกว่า Goethite และ Hematite ระดับพีเอชของน้ำเสียที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ พีเอชประมาณ 6

และเนื่องจากเหล็กออกไซด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสภาพเป็นสารแขวนลอย หรือเจลของไฮดรอกไซด์ ซึ่งการแยกออกจากน้ำทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยต่างๆ ที่พยายามนำเหล็กออกไซด์ไปเคลือบบนผิววัสดุที่เป็นของแข็งต่างๆ ดังเช่นงานวิจัยต่อไปนี้

Scheidegger และคณะ (1993) ศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับจากทราย (silica sand) โดยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ให้อยู่ในรูปของเกอร์ไทต์ (goethite) เพื่อใช้ดูดซับโลหะ โดยศึกษาระดับของพีเอชที่มีผลต่อการเตรียมตัวดูดซับ พบว่าเมื่อเพิ่มพีเอชให้สูงขึ้นจนเข้าใกล้ค่า PZC ($pH_{PZC}=7.9$) สามารถเคลือบเหล็กออกไซด์ให้อยู่ในรูปเกอร์ไทต์ได้ดีที่สุด และทำการยืนยันโครงสร้างของตัวดูดซับที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่ามีการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมี คือ Fe-O-Si ซึ่งมีความแข็งแรง และยังพบว่าทรายที่เคลือบด้วยเกอร์ไทต์จะมีรูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะสูงขึ้นตามด้วย

Lai และคณะ (2000) ศึกษาการดูดซับทองแดง และตะกั่วด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในภาวะที่มีการแข่งขันกัน โดยทำการศึกษาในระบบเบตซ์ และคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง และตะกั่วเป็น 1×10^{-4} M และ 5×10^{-5} M ตามลำดับ ช่วงพีเอชที่ศึกษา คือ 2.5 ถึง 6.5 ผลการศึกษาพบว่าทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับทั้งทองแดง และตะกั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่า

Zeng (2003) ศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับที่ประกอบด้วยซิลิกาเจลและเหล็กออกไซด์เพื่อดูดซับอาร์เซนิก โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเตรียม ดังนี้ อัตราส่วนของซิลิกาต่อปริมาณเหล็ก ระยะเวลาในการเคลือบ และอุณหภูมิที่ใช้อบหลังทำการเคลือบ จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กให้สูงขึ้นความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกก็สูงขึ้นตามด้วย ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับ คือ 0.33 ($\text{Fe/Si} = 3 \text{ mol/mol}$) ส่วนระยะเวลาในการเตรียม และอุณหภูมิที่ใช้ไม่มีผลต่อการดูดซับอาร์เซนิกอย่างมีนัยสำคัญ แต่อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งมีผลต่อความแข็งแรงของตัวดูดซับ (adsorbent strength) ซึ่งหากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 250°C เหล็กออกไซด์อาจก่อตัวเป็น Fe_2O_3 (hematite)

เบญจวรรณ (2547) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่ว และทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยศึกษาวิธีการเตรียม 2 วิธี คือ Modified Adsorption Method ซึ่งเป็นการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูง ก่อนนำไปเคลือบบนผิวของซิลิกาเจล และการเตรียมแบบ Modified Precipitation Method คือ การทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนไปพร้อมกับ การเคลือบบนผิวของซิลิกาเจล ผลการศึกษาพบว่าหลังจากการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ความสามารถในการจับโลหะสูงขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว และทองแดงโดยใช้ซิลิกาเจลเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าระยะเวลาในการดูดซับที่ 30 นาที และพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 5.5

Peng และคณะ (2005) ได้ทำการทดลองเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวของ carbon nanotubes เพื่อกำจัดตะกั่ว และ ทองแดง ออกจากน้ำ โดยทำการศึกษาในระบบแบทช์ ผลการศึกษาพบว่า carbon nanotubes ที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้จะอยู่ในรูปของ Fe_3O_4 (magnetite) และ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemite) และพีเอชเริ่มต้นของสารละลายโลหะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะทั้งสองชนิด โดยพบว่าที่พีเอชต่ำ ๆ ความสามารถในการดูดซับจะลดลง และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะทั้งสองชนิดก็เพิ่มขึ้นตามด้วย

Gupta และคณะ (2005) ศึกษาการดูดซับ อาร์เซนิก จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับแบบแบทช์ (batch) ซึ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับดังนี้ ระดับพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิก และปริมาณของตัวดูดซับ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับกับทรายที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์พบว่า ทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าที่ไม่ได้เคลือบ คือ 28.57 และ 5.63 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยทำที่พีเอช 7.5 เป็นเวลา 2

ชั่วโมง และพบว่ามีความสามารถในการกำจัดเป็น 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ตัวดูดซับ 20 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิก 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

Zhang และ Itoh (2005) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิก โดยใช้กากที่เหลือจากเตาเผาขยะเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับกับกากที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมโดยการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์เซนิกสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเหล็กออกไซด์สามารถนำไปเคลือบบนผิวตัวกลางที่เป็นของแข็งได้หลายชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่ใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนมาเป็นตัวกลางเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อนำไปใช้บำบัดโลหะในน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ดีสำหรับเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อนำไปใช้ดูดซับโลหะออกจากน้ำ โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบ ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และนำไปใช้ดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียจริงต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอน และวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.1.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
- 3.1.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนก่อน และหลังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
- 3.1.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์
- 3.1.4 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนัก
- 3.1.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะจากกากตะกอนจากต่างแหล่งที่ผ่านการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับจาก Carbon Charcoal, Activated Carbon และตัวดูดซับที่เป็น Cation Resin
- 3.1.6 ทดสอบกับน้ำเสียจริง

3.2 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

	ยี่ห้อ:รุ่น
1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง	Mettler : AT200
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)	ORION : 7104
3. Transferpette (Micropipette)	Bran : 0.5 – 10 μ L
4. Transferpette	Bran : 10 - 100 μ L
5. Transferpette	Bran : 100 – 1000 μ L
6. Transferpette	Bran : 0.5 - 5 mL
7. เครื่อง Surface Area Analyzer	Quantachrome : Autosorb-1
8. เครื่อง Scanning Electron Microscope	Jeol : JSM 6400
9. เครื่อง CHNS/O Analyzer	Perkin Elmer : PE2400 SeriesII
10. เครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS)	Perkin Elmer : AAnalyst 100

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ (ต่อ)

ยี่ห้อ : รุ่น

11. แผ่นให้ความร้อน(Hot plate)	CORNING : PC-620
12. เครื่องอังน้ำ(Water bath)	Bosstech : THERMAL TMD/1
13. ตู้อบ	Memmert : 500
14. เตาเผา	Nabertherm : Controller P320
15. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)	SANYO : CENTAUR2
16. กระดาษกรอง	Whatman No.41
17. เครื่องคนแม่เหล็ก	Gem : MS101
18. ตะแกรงคัดขนาด 70 MESH (Sieve)	
19. แท่งคนแม่เหล็ก	
20. ขวดพลาสติก	
21. เครื่องแก้ว	
22. โกร่ง (Mortar)	
23. เทอร์โมมิเตอร์	
24. นาฬิกาจับเวลา	

3.2.2 สารเคมี

คุณสมบัติ

1. Activated charcoal (SIGMA)	Analytical Reagent Grade
2. Activated carbon (Mazuma)	Food Grade
3. Cadmium standard solution 1,000 ± 5 mg/L (BDH)	Standard Solution
4. Calcium nitrate (Riedel-deHaën)	Analytical Reagent Grade
5. Cation resin (Mazuma)	Food Grade
6. Copper nitrate (Merck)	Analytical Reagent Grade
7. Copper standard solution 1,001 ± 5 mg/L (BDH)	Standard Solution
8. Ferric nitrate nonahydrate (CARLO ERBA)	Analytical Reagent Grade
9. Hydrochloric acid 37% (Merck)	Analytical Reagent Grade
10. Iron standard solution 999±2 mg/L (Merck)	Standard Solution
11. Lead standard solution 1,001 ± 5 mg/L (BDH)	Standard Solution
12. Nickel standard solution 1,000 mg/L (Fisher)	Standard Solution
13. Nitric acid 65% (Merck)	Analytical Reagent Grade

3.2.2 สารเคมี (ต่อ)

คุณสมบัติ

14. Sodium acetate (CARLO ERBA)	Analytical Reagent Grade
15. Sodium hydroxide (Merck)	Analytical Reagent Grade
16. Sodium nitrate (Fluka)	Analytical Reagent Grade
17. Sodium sulfate (Fisher)	Analytical Reagent Grade

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ศึกษาวิธีการเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวกากตะกอนด้วยวิธี Modified Adsorption (เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547) โดยทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูงก่อนนำไปเคลือบบนผิวกากตะกอน โดยทำการเคลือบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีขั้นตอนในการเคลือบ ดังรูปที่ 3.1

กากตะกอนบดละเอียด 5 กรัม

+

สารละลายเฟอร์ริกไนเตรท $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ 10 มิลลิลิตร

ปรับพีเอชให้ได้ค่าที่ต้องการด้วยสารละลาย NaOH 0.1 และ 1 M

↓
คนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก 1 ชม.

↓
อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 20 ชม.

↓
ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชคงที่

↓
อบต่อที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชม.

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
ด้วยวิธี Modified Adsorption Method

จากการเคลือบด้วยวิธี Modified adsorption ข้างต้น ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเคลือบ ได้แก่ พีเอชของสารละลายเหล็ก ระยะเวลาในการเคลือบ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กโดยใช้ปริมาณของเฟอร์ริกไนเตรทที่ต่างกัน และอุณหภูมิที่ใช้อบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ ตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและช่วงที่ทำการศึกษาในการเคลือบ

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอชของสารละลายเหล็ก	พีเอช 2 , 7 และ 12
2. ระยะเวลาในการเคลือบ	0.5, 1, 3, 6 และ 24 ชม.
3. ปริมาณของเฟอร์ริกไนเตรท	0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 กรัม
4. อุณหภูมิที่ใช้อบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ	100°C, 300°C, และ 500°C (อบ3 ชม.)

3.3.1.1. พีเอชของสารละลายเหล็ก

เตรียมสารละลายเหล็กโดยชั่งเฟอร์ริกไนเตรท 0.5 กรัม ละลายน้ำ 10 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ (พีเอช 2, 7 และ 12) ด้วย NaOH 0.1 M และ 1 M จากนั้นเติมกากตะกอนลงไป 5 กรัม คน 60 นาที นำไปอบที่ 105°C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชคงที่ แล้วนำไปอบต่อที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชม.

3.3.1.2. ระยะเวลาในการเคลือบ

ชั่งเฟอร์ริกไนเตรท 0.5 กรัม ละลายน้ำ 10 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้ได้ 12 ด้วย NaOH 0.1 M และ 1 M จากนั้นเติมกากตะกอนลงไป 5 กรัม โดยทำ 5 ชุดการทดลอง โดยใช้เวลาในการคนของผสมระหว่างกากตะกอนและสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทเป็น 30 นาที 1, 3, 6 และ 24 ชม. ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบที่ 105°C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชคงที่ แล้วนำไปอบต่อที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชม.

3.3.1.3. ปริมาณเฟอร์ริกไนเตรท

ชั่งเฟอร์ริกไนเตรท 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 กรัม ละลายในน้ำ 10 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้ได้ 12 ด้วย NaOH 0.1 M และ 1 M จากนั้นเติมกากตะกอนลงไป 5 กรัม คน 60 นาที นำไปอบที่ 105°C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชคงที่ แล้วนำไปอบต่อที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชม.

3.3.1.4. อุณหภูมิที่ใช้ออบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ

นำกากตะกอนที่บดละเอียดมาอบที่อุณหภูมิ 100, 300 และ 500°C เป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นนำกากตะกอนที่อบแล้วมาอย่างละ 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายเหล็ก 10 มิลลิลิตร ที่มีเฟอร์ริกไนเตรทละลายอยู่ 2.0 กรัม และพีเอชของสารละลายเหล็กเท่ากับ 12 จากนั้นคนให้เข้าเป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปอบที่ 105°C เป็นเวลา 20 ชม. นำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนพีเอชคงที่ แล้วนำไปอบต่อที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชม.

นำกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ในแต่ละภาวะไปเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะโดยใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวแทนของโลหะที่จะศึกษา และทำการทดลองด้วยระบบกะ (batch) โดยชั่งตัวดูดซับที่เตรียมได้มา 0.01 กรัม ผสมกับสารละลายทองแดงเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชม. แล้วนำไปหมุนเหวี่ยง (centrifuge) 5 นาที จากนั้นนำส่วนที่เป็นสารละลายไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเทคนิค Flame atomic absorption spectrometry (FAAS)

3.3.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

นำกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีกากเคลือบที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.1 มาศึกษาคุณลักษณะพื้นผิว พื้นผิว ขนาคูรูป รุน ปริมาตรรูพรุน องค์ประกอบและปริมาณทางเคมี โดยใช้เครื่องมือและเทคนิค ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์ลักษณะ และคุณสมบัติของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

ลักษณะ/คุณสมบัติ	เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้
ลักษณะพื้นผิว พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ปริมาณเหล็ก องค์ประกอบทางเคมี (%C H N)	Scanning Electron Microscope (SEM/EDX) Surface Area Analyzer (BET) FAAS ตาม USEPA METHOD 3050B CHNS/O Analyzer

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อหาปริมาณเหล็กจากตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยดัดแปลงจากวิธี USEPA METHOD 3050B มีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งตัวดูดซับมา 1.0 กรัม
- เติม สารละลาย 1:1 HNO₃ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดฝาด้วยกระจกนาฟิกา นำไปให้ความร้อนบนแผ่นความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10-15 นาที โดยไม่ให้เดือด ทิ้งไว้ให้เย็น
- เติมกรด HNO₃ เข้มข้น 5 มิลลิลิตร เปิดกระจกนาฟิกาออก แล้ว reflux ต่อ 30 นาที หากเกิดควันสีน้ำตาลให้ทำขั้นตอนนี้ซ้ำโดยการเติมกรด HNO₃ ลงไปอีก 5 มิลลิลิตร หรือ เติมจนกว่าไม่เกิดควันสีน้ำตาล
- ปล่อยให้สารละลายระเหยเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร โดยไม่ให้เดือด
- จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 5 นาที แล้วเติม 30% H₂O₂ 5 มิลลิลิตร ปิดกระจกนาฟิกาแล้วนำไปให้ความร้อนต่อจนปริมาตรของสารละลายเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร
- ปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมกรด HCl เข้มข้นลงไป 10 มิลลิลิตร ปิดกระจกนาฟิกาแล้วนำไป reflux ต่อเป็นเวลา 15 นาที
- นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.41
- นำสารละลายใสที่ได้ไปปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน
- นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กด้วยเทคนิค FAAS

3.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว (Cu(II), Cd(II), Ni(II), Pb(II)) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบกะ (batch) โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ตามภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.1 มาทำการศึกษา โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ พีเอชของสารละลายโลหะ ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะ ปริมาณตัวดูดซับและผลของไอออนรบกวนอื่น ๆ โดยนำผลที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของไอออนโลหะที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ และเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดต่อไป

3.3.3.1 ผลของพีเอชของสารละลายโลหะต่อการดูดซับโลหะ

เตรียมสารละลายทองแดง และแคดเมียมความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายนิกเกิล และตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งละลายอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M และปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น พีเอช 1-9 จากนั้นเปิดสารละลายโลหะมา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้แล้ว 0.01 กรัม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชม. นำไปหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 2,500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายใสที่ได้ไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วยเทคนิค FAAS โดยทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และทำการทดลองกับสารละลายโลหะแยกแต่ละชนิด

3.3.3.2 ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกจากตัวดูดซับขณะทำการดูดซับไอออนของโลหะหนัก

นำสารละลายทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ช่วงพีเอช 1-9 ที่ผ่านการดูดซับแล้วจากข้อ 3.3.3.1 ที่ทำการทดลองเรื่องพีเอชของสารละลายโลหะข้างต้น มาวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับขณะทำการดูดซับไอออนของโลหะหนัก ด้วยเทคนิค FAAS

3.3.3.3 ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะ

เตรียมสารละลายโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชของสารละลายโลหะให้ได้พีเอช 5 ด้วยกรด HNO_3 1% และ NaOH 0.01-1.0 M และเตรียมสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้ได้ 4 ด้วยกรด HNO_3 1% และ NaOH 0.01-1.0 M ซึ่งสารละลายโลหะทั้งสี่ชนิดเตรียมในสารละลายบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M จากนั้นเปิดสารละลายโลหะที่เตรียมได้มา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวดูดซับที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01 กรัม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 10 15 20 30 45 และ 60 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 2,500 รอบ/นาที นำสารละลายใส่ไปตรวจวัดหาความเข้มข้นที่เหลือด้วยเทคนิค FAAS โดยทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และทำการทดลองกับสารละลายโลหะแยกแต่ละชนิด

3.3.3.4 ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้

เตรียมสารละลายทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ความเข้มข้น 50, 30, 20 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M และปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 5 ด้วย 1% HNO_3 และ NaOH 0.01-1.0 M ยกเว้นสารละลายตะกั่วปรับพีเอชให้ได้ 4 จากนั้นเปิดสารละลายโลหะที่เตรียมได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวดูดซับที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01, 0.05 และ 0.10 กรัม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นำสารละลายใส่ไปตรวจวัดหาความเข้มข้นที่เหลือด้วยเทคนิค FAAS โดยทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และทำการทดลองกับสารละลายโลหะแยกแต่ละชนิด

3.3.3.5 ผลของไอออนรบกวน

เตรียมสารละลายทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M ปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 5 ด้วย 1% HNO_3 และ NaOH 0.01-1.0 M ส่วนสารละลายตะกั่วเตรียมที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M เช่นเดียวกัน ปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 4 และในสารละลายโลหะทั้งสี่ชนิดมีเกลือของ NaNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และ Na_2SO_4 ละลายอยู่ในความเข้มข้น 0.01 M และ 0.5 M

จากนั้นเปิดสารละลายที่เตรียมได้มาอย่างละ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01 กรัม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นำสารละลายใส่ที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือนด้วยเทคนิค FAAS โดยทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และทำการทดลองกับสารละลายโลหะแยกแต่ละชนิด

3.3.4 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไอออนของโลหะด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ชุดเดียวกับที่ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ซึ่งทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

เตรียมสารละลายทองแดง และแคดเมียม ความเข้มข้น 20-160 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายนิกเกิลความเข้มข้น 10-140 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งละลายอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M และปรับพีเอชของสารละลายทองแดง แคดเมียม และนิกเกิลให้ได้พีเอช 5 ส่วนสารละลายตะกั่ว ปรับให้ได้พีเอช 4 ด้วย 1% HNO_3 และ NaOH 0.01-1.0 M จากนั้นเปิดสารละลายที่เตรียมได้มาอย่างละ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01 กรัม จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก โดยกวนใน water bath ที่มีอุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารละลายใส่ไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือนด้วยเทคนิค FAAS โดยทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และทำการทดลองกับสารละลายโลหะแยกแต่ละชนิด

3.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะจากตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนสามแหล่ง คือ โรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร โรงควบคุมคุณภาพน้ำห้วยขวาง และ โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี โดยนำกากตะกอนจากทั้งสามแหล่งมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ตามภาวะที่เหมาะสมในข้อ 3.3.1 และนำไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นตัวแทนของสารละลายโลหะ ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

ซึ่งตัวดูดซับที่เตรียมได้มาอย่างละ 0.01 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นบีบสารละลายทองแดงมา 10 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมสารละลายทองแดงในภาวะที่มีบัฟเฟอร์ (CH_3COONa) ความเข้มข้น 0.05 M ละลายอยู่ และปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 5 ด้วย 0.01-1.0 M NaOH และ 1% HNO_3 จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วยเทคนิค FAAS โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ

3.3.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์กับตัวดูดซับที่นิยมใช้ทั่วไป

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะทั้งสี่ชนิดได้แก่ ทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ และตัวดูดซับที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ Carbon Charcoal, Activated Carbon และตัวดูดซับที่เป็น Cation Resin ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

เตรียมสารละลายโลหะทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเตรียมสารละลายโลหะในภาวะที่มีบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M ละลายอยู่ และปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 5 ด้วย 0.01-1.0 M NaOH และ 1% HNO_3 ส่วนสารละลายตะกั่วเตรียมที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในภาวะที่มีบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M ละลายอยู่ และปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 4 ด้วย 0.01-1.0 M NaOH และ 1% HNO_3 จากนั้นบีบสารละลายที่เตรียมได้มาอย่างละ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ตัวดูดซับที่เป็น Carbon Charcoal ตัวดูดซับที่เป็น Activated Carbon และตัวดูดซับที่เป็น Cation Resin ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01 กรัม จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารละลายไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วยเทคนิค FAAS โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ และทำการทดลองกับสารละลายโลหะแยกแต่ละชนิด

3.3.7 ศึกษาการดูดซับโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนของโลหะผสม

ศึกษาการดูดซับโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วผสมอยู่ โดยเตรียมสารละลายโลหะผสมทั้งสี่ชนิดให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.3 มิลลิโมลต่อลิตร ในภาวะที่มีบัฟเฟอร์ CH_3COONa ความเข้มข้น 0.05 M ละลายอยู่ และปรับ

พีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 5 ด้วย 0.01-1.0 M NaOH และ 1% HNO₃ จากนั้นเปิดสารละลายที่เตรียมได้มา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01 จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารละลายไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือนับด้วยเทคนิค FAAS โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.3.8 ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการ

นำน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วละลายอยู่ไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดก่อน แล้วจึงนำน้ำเสียที่มีโลหะแต่ละชนิดละลายอยู่ มาผสมกันให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมกับความสามารถในการดูดซับของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ (ดังที่ได้ศึกษาแล้วข้างต้นในข้อ 3.3.3) จากนั้นนำน้ำเสียที่มีโลหะผสมอยู่ทั้งสี่ชนิดไปวัดค่าพีเอชแล้วปรับพีเอชของน้ำเสียให้ได้ประมาณพีเอช 5 ด้วย NaOH 0.1 M พร้อมกับศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย ได้แก่ สี กลิ่น และความขุ่น แล้วจึงนำน้ำเสียไปตรวจวัดหาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะด้วยเครื่อง FAAS อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นเปิดน้ำเสียที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ซึ่งเตรียมไว้ 0.01 กรัม 0.05 กรัม และ 0.10 กรัม จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำสารละลายไปตรวจวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือนับด้วยเทคนิค FAAS โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับของโลหะจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนของโลหะทั้งสี่ชนิดผสมอยู่ที่ได้ทำการทดลองจากข้างต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนของโลหะ พิจารณาจากความสามารถของตัวดูดซับในการจับกับไอออนของโลหะ (Adsorption capacity; Q) ดังสมการที่ (3.1) และเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดโลหะหนัก (%Removal; R) ดังสมการที่ (3.2)

$$Q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (3.1)$$

$$R = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \quad (3.2)$$

- Q = ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ (mg/g)
R = เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนของโลหะ
C₀ = ความเข้มข้นของสารละลายโลหะเริ่มต้น (mg/L)
C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ (mg/L)
m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)
V = ปริมาตรของสารละลาย (L)

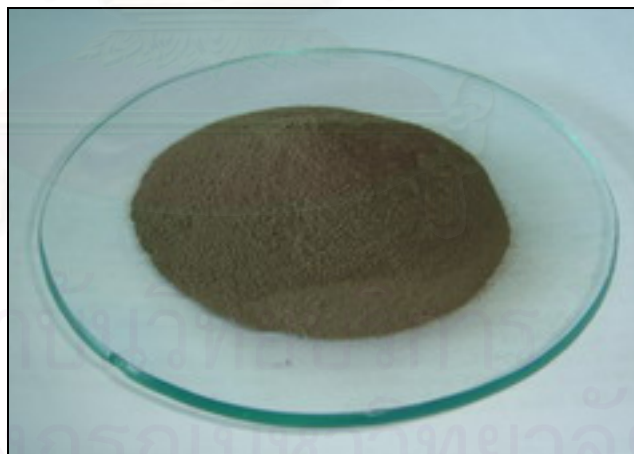
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะในน้ำ ได้แก่ ทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้กากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งเตรียมตัวดูดซับโดยวิธี Modified Adsorption (เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547) กากตะกอนที่นำมาเป็น วัสดุคืบในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร โรงควบคุมคุณภาพ น้ำดินแดง และโรงควบคุมคุณภาพน้ำชองนนทบุรี โดยนำกากตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำออกแล้วด้วย เครื่องรีดตะกอน (Belt Filter Press) มาตากให้แห้งและบดให้ละเอียดก่อนนำไปใช้ทดลอง ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในการทดลองส่วนนี้เลือกใช้กากตะกอนจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักรเป็นตัวแทนกาก ตะกอนที่ใช้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ และเลือกใช้ โลหะทองแดงเป็นตัวแทนของโลหะที่จะศึกษาโดยมีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

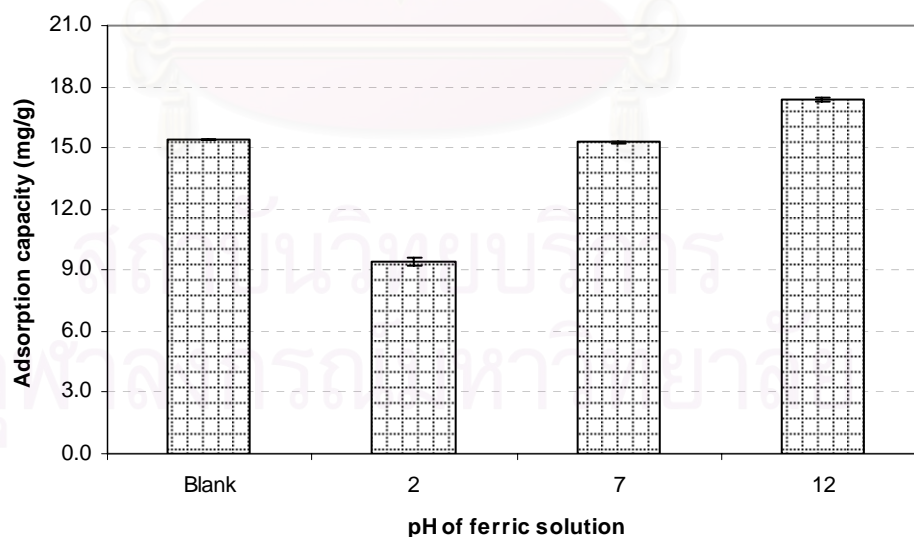


รูปที่ 4.1 ลักษณะของกากตะกอนแห้งบดละเอียดสำหรับการทดลอง

การเคลือบกากตะกอนด้วยวิธี Modified Adsorption เป็นการเตรียมกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอชสูง ก่อนนำไปเคลือบบนผิวของกากตะกอน ซึ่งเป็นการเคลือบแบบกายภาพ และทำการเคลือบที่อุณหภูมิห้อง โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบกากตะกอน โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ พีเอชของสารละลายเหล็ก ระยะเวลาในการเคลือบ ปริมาณของเฟอร์ริกไนเตรท อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ

4.1.1 ผลของพีเอชของสารละลายเหล็ก

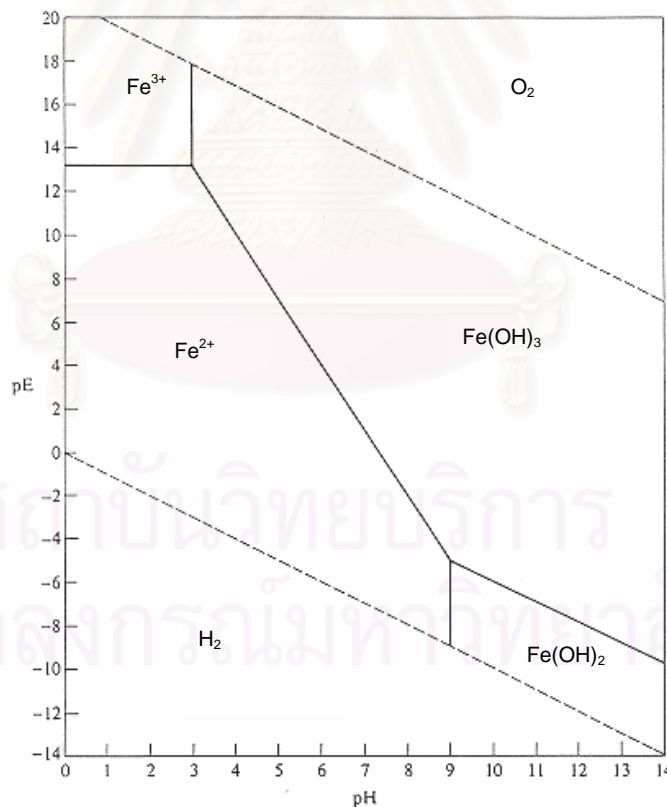
ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายเหล็กที่ใช้ในการเคลือบ โดยการปรับพีเอชของสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทสำหรับการเคลือบ เป็นพีเอช 1.73, 7.03 และ 12.02 ก่อนที่จะผสมกับกากตะกอน ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารละลายเฟอร์ริกไนเตรทที่เตรียมที่พีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงก็สูงขึ้นด้วย โดยเพิ่มขึ้นจาก 9.43 ถึง 17.36 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเพิ่มพีเอชจาก 1.73 เป็น 12.02 และเมื่อเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบพบว่า การปรับพีเอชของสารละลาย เฟอร์ริกไนเตรทให้เป็นพีเอช 12.02 มีความสามารถในการดูดซับทองแดงสูงกว่าเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเคลือบกากตะกอนด้วยสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทที่ปรับพีเอชให้เป็น 12 ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับสูงขึ้น



รูปที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับทองแดงด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชของสารละลายเหล็กเท่ากับ 1.73, 7.03 และ 12.02

การที่สารละลายเฟอร์ริกไนเตรทที่พีเอช 12 สามารถเคลือบกากตะกอนให้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุด ทั้งนี้เพราะ สารละลายเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) สามารถเกิดเป็นตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ได้ดีที่พีเอชสูง ๆ (ดังรูปที่ 4.3) ดังนั้นที่พีเอชสูง ๆ จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวดูดซับ เพราะสามารถเกิดเป็นตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ได้ดีทำให้สามารถเคลือบอยู่ที่ผิวของกากตะกอนได้มากกว่าภาวะที่พีเอชของสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทที่พีเอชต่ำ ๆ

ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ เบญจวรรณ ในปี พ.ศ. 2547 ที่ทำการเคลือบเหล็กออกไซด์บนตัวกลางที่เป็นซิลิกาเจล โดยการทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอช 12 ก่อน แล้วนำไปเคลือบบนผิวของซิลิกาเจล พบว่าสามารถดูดซับทองแดงได้ดีกว่าการเคลือบด้วยสารละลายเหล็กที่พีเอชต่ำ ๆ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกทำการเคลือบกากตะกอนโดยการปรับพีเอชของสารละลายเหล็กให้เป็น 12 ก่อนนำไปเคลือบบนผิวของกากตะกอน เพื่อใช้ในการศึกษาตัวแปรอื่นที่มีผลต่อการเคลือบต่อไป



รูปที่ 4.3 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก (Vanloon และ Duffy, 2001)

4.1.2 ผลของระยะเวลาในการเคลือบ

ศึกษาผลของระยะเวลาในการเคลือบกากตะกอน โดยใช้ระยะเวลาในการค่นของ ผสมระหว่างกากตะกอนกับสารละลายเหล็กที่ปรับ pH เป็น 12 ± 0.6 เป็นเวลา 0.5, 1, 3, 6 และ 24 ชั่วโมง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงของตัวดูดซับที่เตรียมได้ โดยทำการ ทดลองการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมได้ซ้ำ 3 ครั้ง และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ระยะเวลา ในการเคลือบ 0.5, 1, 2, 6 และ 24

ระยะเวลาในการเคลือบ (ข.ม.)	Adsorption capacity (mgCu/gSludge) ^a
0.5	16.6 ± 0.3
1	17.9 ± 0.1
3	17.9 ± 0.1
6	16.3 ± 0.2
24	18.3 ± 0.3

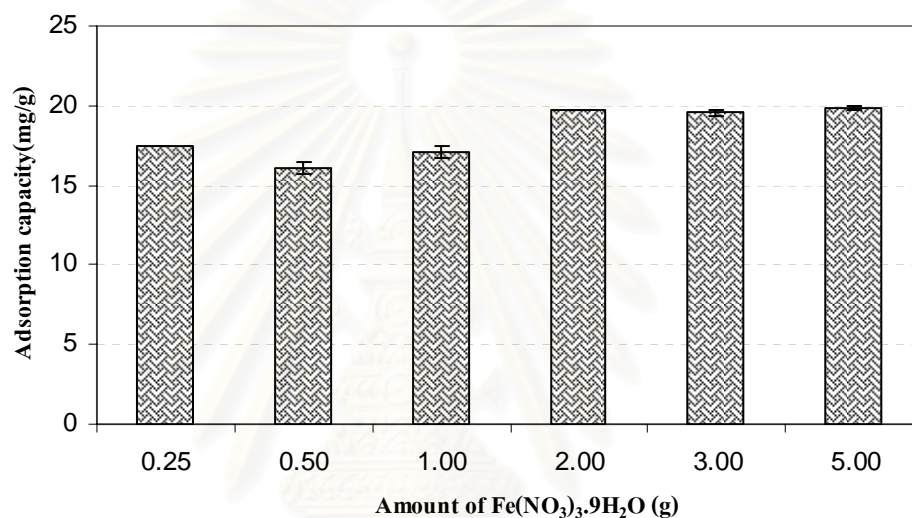
^a ค่าเฉลี่ย \pm SD (n = 3)

จากผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาในการเคลือบสารละลายเหล็กกับกากตะกอน เมื่อ เพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างกากตะกอนและสารละลายเฟอร์ริกในเตรทจาก 30 นาที เป็น 1 ชั่วโมง และมากกว่า พบว่าประสิทธิภาพในการจับทองแดงของตัวดูดซับที่ได้ จะสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อใช้ ระยะเวลาสัมผัสเป็น 24 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับทองแดงได้มากที่สุด คือ 18.3 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับที่เวลาเคลือบ 1 ชั่วโมง พบว่าค่า ความสามารถในการดูดซับค่าใกล้เคียงกัน คือ 17.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น ในการศึกษาตัวแปรใน การเคลือบตัวต่อไป จึงเลือกระยะเวลาในการเคลือบที่ 1 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน และประหยัดเวลาในการเตรียม

4.1.3 ผลของปริมาณของเฟอร์ริกในเตรท

ในการศึกษานี้ ใช้ปริมาณของเฟอร์ริกในเตรทในการเคลือบบนผิวของกากตะกอน ในช่วง 0.25-5.0 กรัม ละลายในน้ำ 10 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.35, 0.69, 1.39, 2.77, 4.16 และ 6.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยปรับพีเอชของสารละลายเหล็กให้ได้พี

เอช 12.29 ± 0.21 ก่อนทำการเคลือบกากตะกอนปริมาณ 5 กรัม ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.4 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับ จะได้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น นั่นคือเมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกไนเตรทจาก 0.25 กรัม เป็น 2.0 กรัม ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 17.5 เป็น 19.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และประสิทธิภาพของตัวดูดซับไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ปริมาณเฟอร์ริกไนเตรทที่สูงขึ้นอีก ดังนั้นปริมาณของเฟอร์ริกไนเตรท 2 กรัม จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้เคลือบกากตะกอนในสัดส่วนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และเป็นปริมาณที่นำไปใช้ในการทดลองถัดไป



รูปที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ใช้เฟอร์ริกไนเตรท 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 5.0 กรัม ในการเคลือบ

ผลจากการทดลองในรูปที่ 4.4 เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกไนเตรทให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 2 กรัมขึ้นไป พบว่าปริมาณของเฟอร์ริกไนเตรทที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของกากตะกอน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพื้นที่ผิวของกากตะกอนมีจำกัด เมื่อถูกเคลือบให้เต็มด้วยเหล็กออกไซด์หมดแล้ว หากเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์เข้าไปอีกก็ไม่สามารถเกาะติดบนพื้นผิวได้ นอกจากนี้กระบวนการเคลือบจะมีขั้นตอนการล้าง ซึ่งเหล็กออกไซด์ส่วนที่เหลือที่ไม่ได้เคลือบบนผิวของกากตะกอนก็จะถูกกำจัดออกไป ดังนั้นปริมาณเฟอร์ริกไนเตรทที่เพิ่มเข้าไปขณะทำการเคลือบจึงไม่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

4.1.4 ผลของอุณหภูมิในการอบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ

ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ โดยใช้อุณหภูมิ 100 °C, 300°C และ 500°C ในการอบกากตะกอนเป็นระยะเวลา 3 ชม. โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้อบก่อนนำไปเคลือบ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่า กากตะกอนเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่เมื่อนำกากตะกอนที่อบแล้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไปทำการเคลือบ จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ทำการอบก่อนนำไปเคลือบที่ 100 °C, 300 °C และ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้อบ

อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้อบ	Adsorption capacity (mg Cu/g Sludge) ^a	
	ไม่ได้เคลือบเหล็กออกไซด์	เคลือบเหล็กออกไซด์
ไม่อบ	13.3 ± 0.4	15.4 ± 0.1
100°C (3 ชม.)	13.1 ± 0.4	17.9 ± 0.3
300°C (3 ชม.)	10.6 ± 0.3	19.1 ± 0.1
500°C (3 ชม.)	6.2 ± 0.2	16.7 ± 0.0

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n = 3)

ในส่วนของกากตะกอนที่ไม่ได้อบเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกับกากตะกอนที่อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ แต่ไม่ได้เคลือบ เห็นได้ว่ากากตะกอนที่ไม่ได้อบมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการดูดซับของกากตะกอนที่ไม่ได้อบอาจเกิดจากสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ติดอยู่กับผิวของกากตะกอนมีส่วนช่วยในการดูดซับ แต่เมื่อทำการอบแล้วสารอินทรีย์บางส่วนที่ระเหยได้หลุดออกไปทำให้เหลือแต่คาร์บอนจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แต่เมื่อนำกากตะกอนที่อบแล้วไปทำการเคลือบต่อ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอบที่อุณหภูมิ 300°C จะมีความสามารถในการดูดซับทองแดงได้ดีที่สุด คือ 19.1 มิลลิกรัมต่อกรัม นั่นคือ องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนที่ไม่ใช่สารประกอบที่สลายตัว

ได้ด้วยความร้อน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการเป็นตัวรองรับในการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ในขณะที่เมื่ออบกากตะกอนที่ 500°C ก่อนนำไปเคลือบจะได้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการอบที่อุณหภูมิ 500°C ในภาวะที่มีออกซิเจน อาจทำให้ปริมาณคาร์บอนถูกเผาจนกลายเป็นเถ้า สังเกตได้จากน้ำหนักของกากตะกอนที่ลดลงเมื่อเทียบกับกากตะกอนอบที่ 300 °C และสีของกากตะกอนที่เปลี่ยนไปคือจากสีดำเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลแดง ซึ่งอาจเป็นสีของเหล็กในกากตะกอนที่มาจากขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) ลงไปในน้ำก่อนเข้าถังตกตะกอนเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำ กากตะกอนที่ได้จากการอบที่อุณหภูมินี้จึงมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสำหรับการเป็นตัวรองรับสำหรับการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์ด้วยวิธี Modification Adsorption Method พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบ คือ ที่พีเอชของสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทเท่ากับ 12 ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างกากตะกอนและสารละลายเฟอร์ริกไนเตรท 1 ชั่วโมง ใช้ปริมาณเฟอร์ริกไนเตรท 2.0 กรัม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ต่อกากตะกอน 5 กรัม และทำการอบกากตะกอนที่ 300°C ก่อนที่จะนำกากตะกอนไปเคลือบ ดังสรุปตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์

ตัวแปรที่ศึกษา	ภาวะที่เหมาะสม
1. พีเอชของสารละลายเหล็ก	พีเอช 12
2. ระยะเวลาในการเคลือบ	1 ช.ม.
3. ปริมาณเฟอร์ริกไนเตรท (Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O) ^a	2.0 กรัม
4. อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบกากตะกอนก่อนทำการเคลือบ	300°C (3 ช.ม.)

^a สำหรับการเคลือบกากตะกอน 5.0 กรัม

4.1.5 ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของวิธีการเคลือบเหล็กออกไซด์

(Repeatability)

เพื่อทำการพิสูจน์ยืนยันว่าวิธีการเตรียมตัวดูดซับจากกากตะกอน โดยวิธีการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่นำเสนอสามารถทำซ้ำได้ จึงได้ทำการการเตรียมตัวดูดซับซ้ำ 15 ครั้ง โดยใช้วิธีที่นำเสนอและภาวะที่เหมาะสมที่แสดงดังตาราง 4.3 และใช้กากตะกอนจากแหล่งเดียวกันที่เก็บครั้งเดียวกันมาทำการเตรียม และหาค่าประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งหมดที่เตรียมได้ แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณค่าทางสถิติโดยเลือกใช้ F-test เพื่ออธิบายผลความต่างของวิธีการเตรียมในแต่ละครั้ง ซึ่งผลการทดสอบการทำซ้ำพบว่า การเคลือบแต่ละครั้งให้ค่าความสามารถในการดูดซับโลหะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ได้ทำซ้ำได้ ผลการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก

4.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของกากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

นำกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมในภาวะที่เหมาะสม มาทำการศึกษาคคุณลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี โดยทำการศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ปริมาณเหล็ก และเปอร์เซ็นต์คาร์บอน โดยเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

ผลการศึกษาจากตารางที่ 4.4 พบว่ากากตะกอนหลังจากที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีขนาดรูพรุนเล็กลงซึ่งอาจเนื่องมาจากเหล็กออกไซด์เข้าไปแทรกในรูพรุนของกากตะกอนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคเหล็กออกไซด์ รวมทั้งตัวเหล็กออกไซด์เองก็มีความเป็นรูพรุนด้วยและขนาดรูพรุนเล็กกว่าของกากตะกอน ทำให้ตัวดูดซับที่ได้หลังเคลือบมีขนาดรูพรุนเล็กลงกว่าเดิม ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่สูงขึ้นกว่ากากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน ปริมาณเหล็ก และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในกากตะกอนที่ไม่เคลือบ และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

ตัวแปรที่ศึกษา	ประเภทของกากตะกอน		
	ไม่อบและไม่เคลือบ	อบที่ 300°C แต่ไม่เคลือบ	อบที่ 300°C และเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
พื้นที่ผิว (m ² /g) ^a	6.31	35.59	59.26
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g) ^a	0.0379	0.0987	0.1371
ขนาดรูพรุน (Å) ^a	240.0	109.7	92.5
ปริมาณเหล็ก (mg/g) ^b	24.6 ± 0.1 ^c	31.2 ± 0.2 ^c	72.8 ± 1.1 ^c
เปอร์เซ็นต์คาร์บอน (%C) ^d	17.78	7.90	6.79

^aหาโดยวิธี Nitrogen adsorption isotherm (BET)

^bหาโดยวิธี USEPA METHOD 3050B

^cค่าเฉลี่ย ± SD (n = 3)

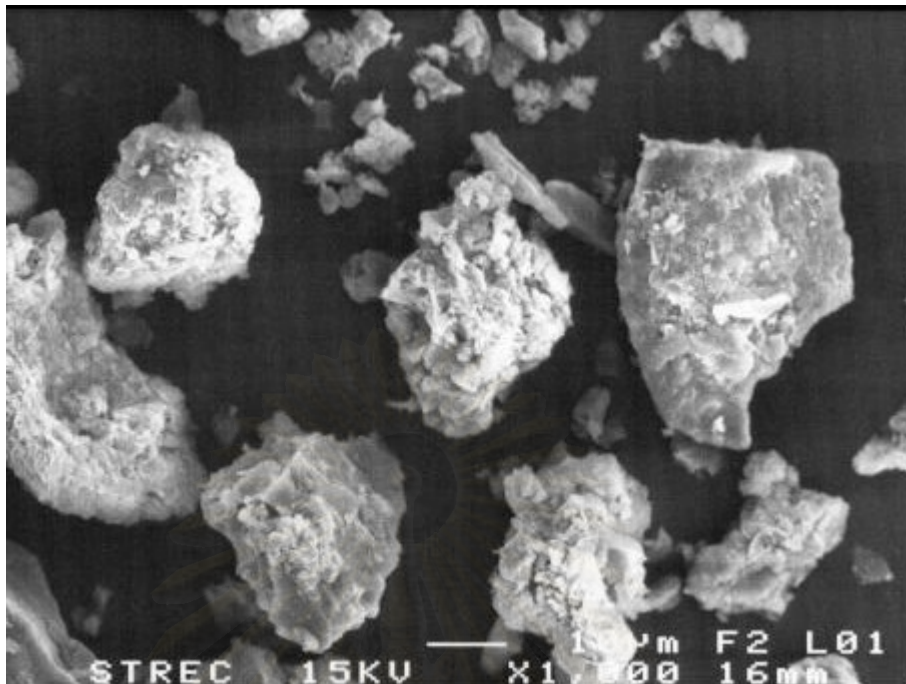
^dหาโดย CHNS/O Analyzer

ปริมาณเหล็กที่ตรวจพบในกากตะกอนที่ไม่ได้อบและที่อบก่อนการเคลือบมีค่าเป็น 24.6 และ 31.2 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ จะเห็นได้หลังจากที่อบแล้วปริมาณของเหล็กสูงขึ้นจากเดิม ทั้งนี้เป็นเพราะการอบกากตะกอนที่ 300°C ทำให้ปริมาณคาร์บอนลดลง ซึ่งส่งผลให้สัดส่วนของเหล็กในกากตะกอนที่อบเพิ่มขึ้นจากเดิมเมื่อเทียบเป็นน้ำหนักต่อกรัมระหว่างกากตะกอนไม่ได้อบ ซึ่งปริมาณเหล็กที่พบในกากตะกอนก่อนทำการเคลือบนี้อาจมาจากขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) ลงไปในน้ำก่อนเข้าถังตกตะกอนเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำ

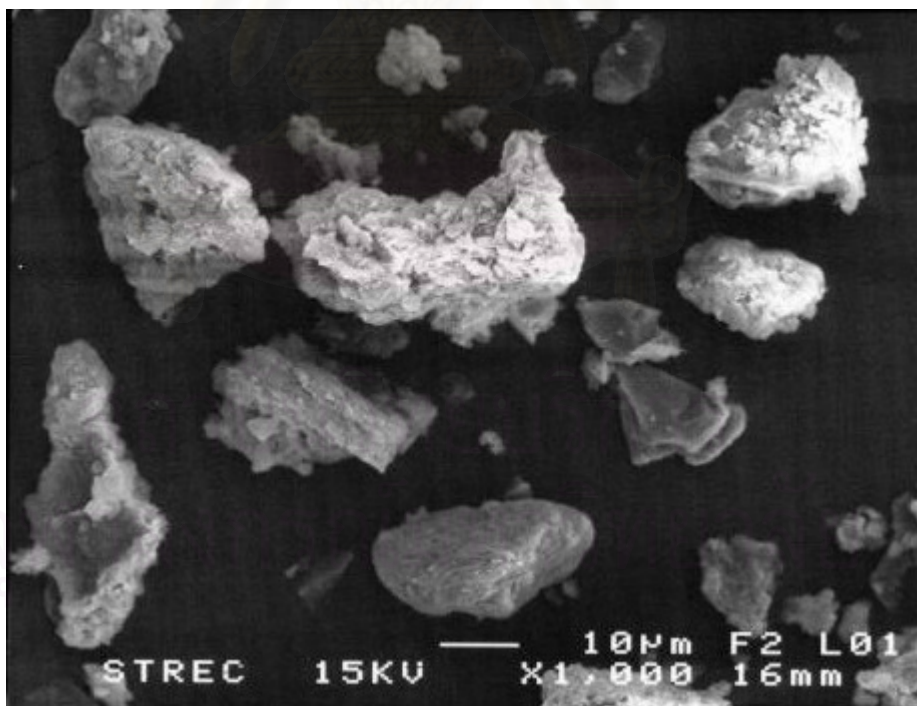
และพบว่าหลังเคลือบมีปริมาณเหล็กสูงกว่ากากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบ สูงถึง 72.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าการเคลือบกากตะกอนด้วยเหล็กออกไซด์โดยวิธี Modified Adsorption สามารถเคลือบเหล็กออกไซด์ติดผิวของกากตะกอนได้จริง

นอกจากนี้ ได้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray (SEM/EDX) พร้อมทั้งทำ mapping เพื่อดูการกระจายตัวของเหล็กบนผิวของกากตะกอน โดยเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ดังแสดงผลในรูปที่ 4.5 ถึง 4.8

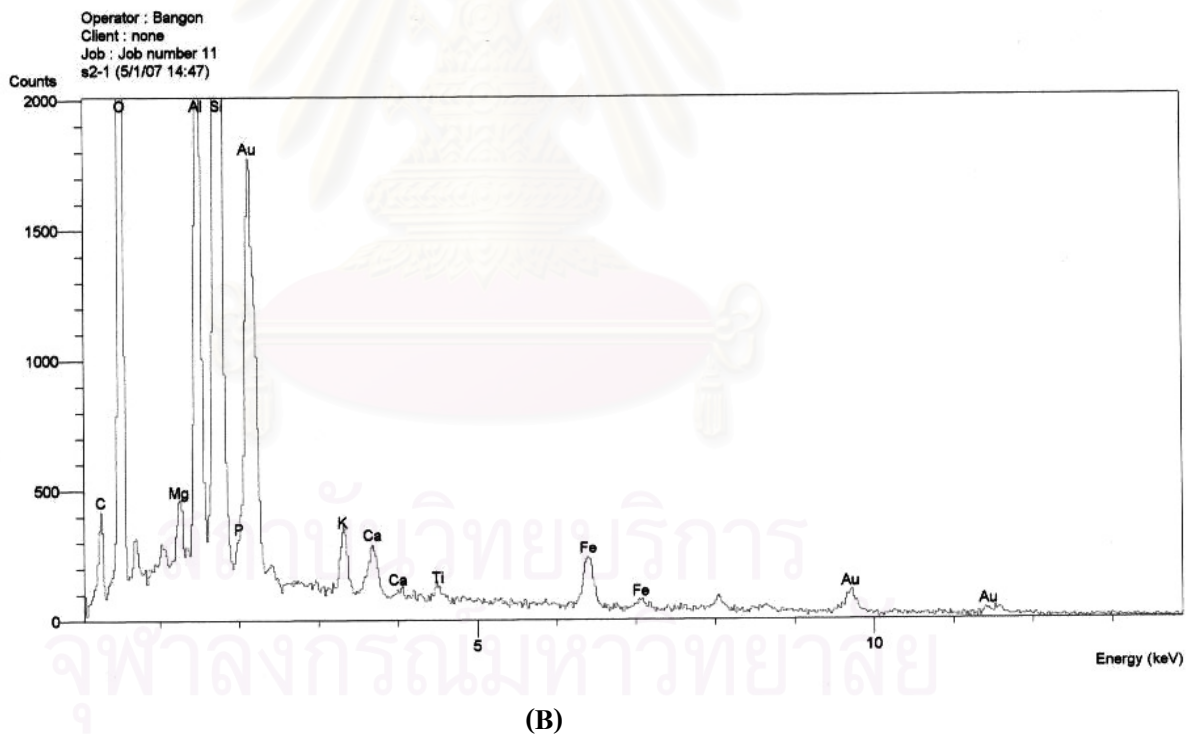
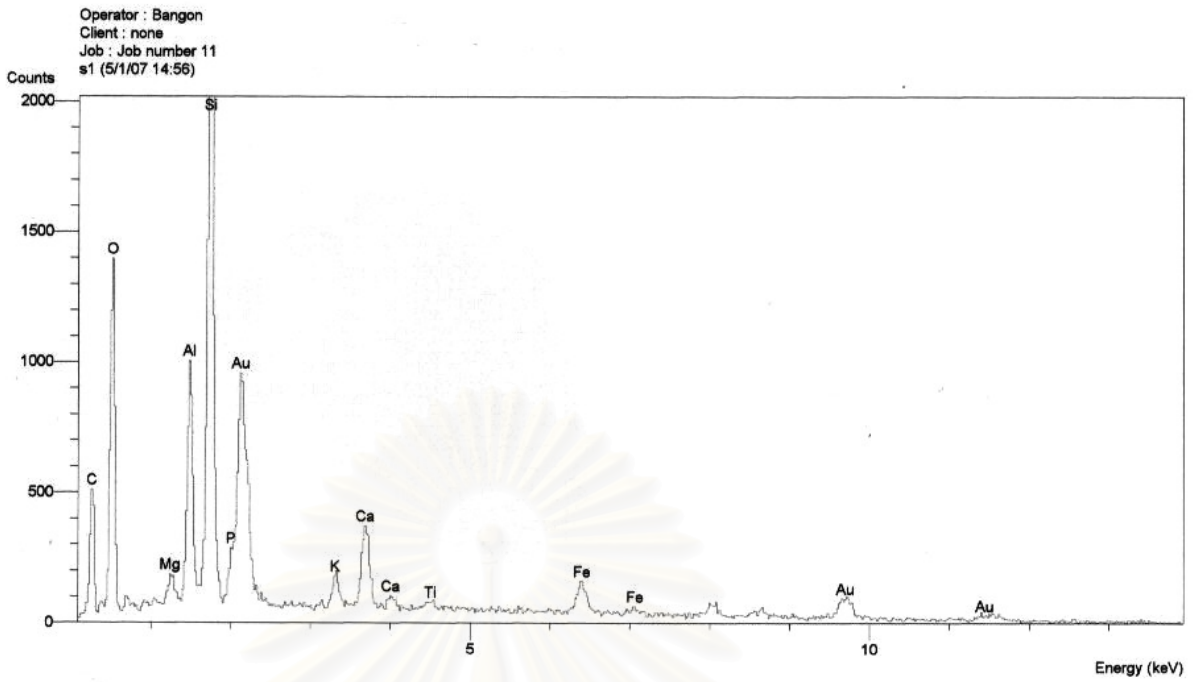
จากภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของกากตะกอนด้วยเครื่อง SEM (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่าลักษณะพื้นผิวของกากตะกอนทั้งที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีลักษณะพื้นผิวคล้ายกัน คือ มีลักษณะแบบอสัณฐาน (amorphous form) แต่ไม่เห็นความแตกต่างของพื้นผิวที่เคลือบและไม่เคลือบเหล็กออกไซด์อย่างชัดเจน เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค SEM/EDX (รูปที่ 4.7) พร้อมกับการทำ mapping เพื่อดูการกระจายตัวของเหล็กบนผิวของกากตะกอน (รูปที่ 4.8) พบว่ามีเหล็กบนพื้นผิวของกากตะกอนจริง และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวดูดซับทั้งก่อนและหลังเคลือบ



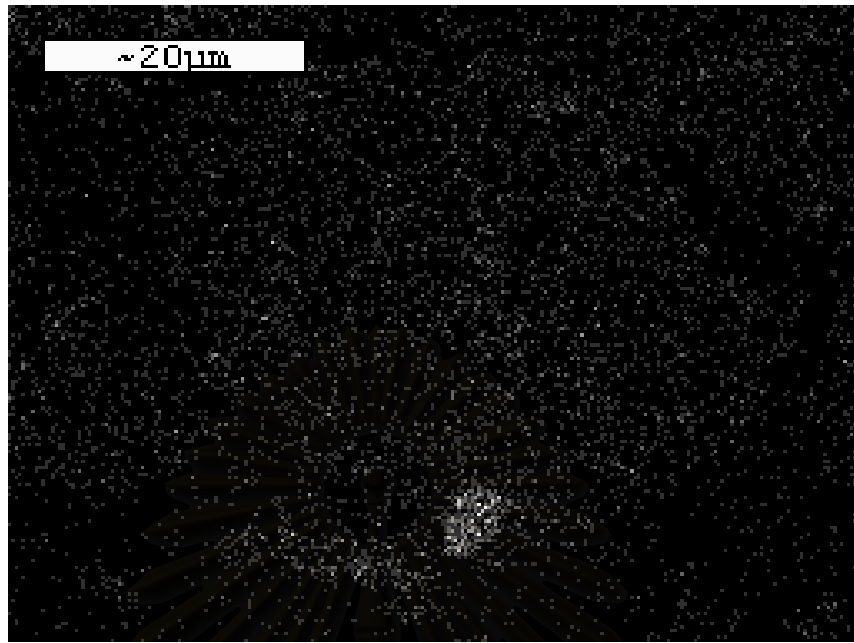
รูปที่ 4.5 พื้นผิวของกากตะกอนอบที่ 300°C ที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ กำลังขยาย 1000 เท่า



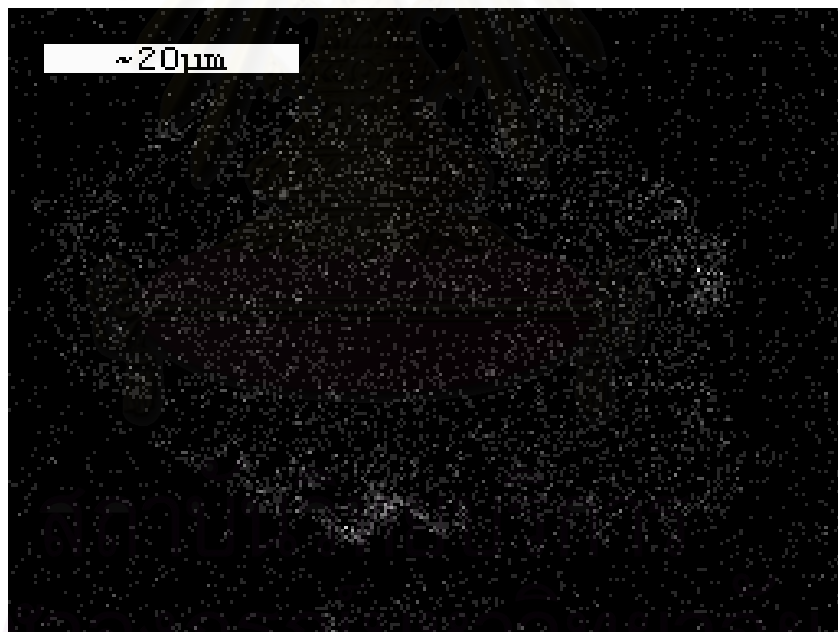
รูปที่ 4.6 พื้นผิวของกากตะกอนอบที่ 300°C และเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวของกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบเหล็กออกไซด์ (A) และ ที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (B)



(A)



(B)

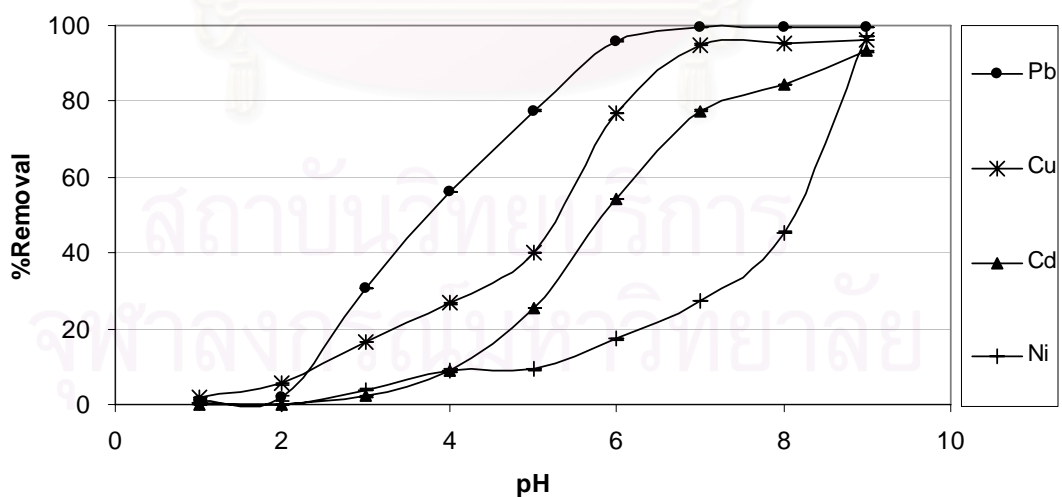
รูปที่ 4.8 ผลของ mapping แสดงการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์บนผิวของกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบ (A) และที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (B) (จุดสีขาวแสดงถึงเหล็กบนพื้นผิว)

4.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ด้วยระบบกะ (batch) โดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษาคือ พีเอชของสารละลายโลหะ ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กขณะทำการดูดซับ ระยะเวลาในการสัมผัส ผลของแคทไอออนและแอนไอออนในน้ำเสีย ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

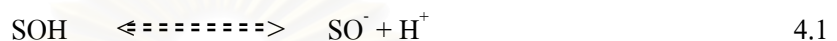
4.3.1 ผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ

ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ ในช่วงพีเอชของสารละลาย 1-9 และความเข้มข้นของโลหะคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตะกั่วและนิกเกิล และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับทองแดงและแคดเมียม ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในสารละลายที่มีพีเอช 1 และ 2 ตัวดูดซับไม่สามารถกำจัดโลหะออกจากสารละลายได้ แต่พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและนิกเกิล คือ ที่พีเอช 7 สำหรับทองแดงและตะกั่ว คือ พีเอช 6 และพีเอช 5 ตามลำดับ ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล ทองแดง และตะกั่วที่พีเอชดังกล่าว คือ 15.5, 8.0, 14.9 และ 22.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วที่พีเอชต่าง ๆ

ในภาวะของสารละลายที่พีเอชต่ำ มีผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะต่ำ เนื่องจากภาวะที่เป็นกรดในสารละลายจะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งจะไปแข่งขันกับไอออนของโลหะในการดูดซับบนพื้นผิวของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ ทำให้พื้นผิวของเหล็กไฮดรอกไซด์ถูก Protonate และไม่สามารถดูดซับไอออนบวกของโลหะได้อีก ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับโลหะได้น้อยลง ในขณะที่เมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น พื้นผิวของเหล็กออกไซด์ถูก Protonate น้อยลงและสามารถจับกับไอออนของโลหะได้มากขึ้น ดังสมการที่ 4.1



นอกจากนี้ การที่ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะเกิดขึ้นได้ดีที่ระดับพีเอชสูงกว่า 7 เกิดจากการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักที่พีเอชดังกล่าวทำให้ปริมาณโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลาย (soluble metal) ลดลง ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นจึงไม่ได้เกิดจากกระบวนการดูดซับอย่างเดียว แต่เกิดจากการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักร่วมกับการดูดซับโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลาย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น

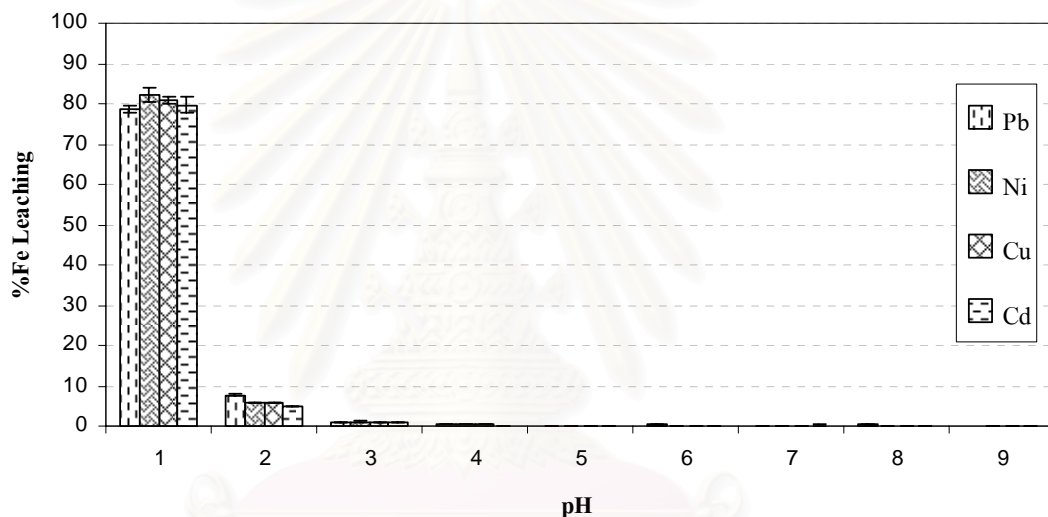
ดังนั้นพีเอชของสารละลายโลหะที่เหมาะสมสำหรับดูดซับทองแดงและแคดเมียม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ ที่พีเอชของสารละลายประมาณ 6 และ 7 ตามลำดับ ส่วนสารละลายนิกเกิล และตะกั่วที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ที่ พีเอช 7 และ 5 ตามลำดับ โดยพีเอชของสารละลายโลหะที่เหมาะสมอาจเพิ่มขึ้น หรือลดลงได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะที่นำมาใช้ในการดูดซับ ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng และคณะ (2005) ที่ได้ศึกษาการเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวของ carbon nanotubes และงานวิจัยของ Gupta และคณะ (2005) ที่ใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับโลหะจากน้ำ โดยพบว่าที่พีเอชต่ำ ๆ ความสามารถในการดูดซับโลหะจะลดลง และเมื่อเพิ่มพีเอชให้สูงขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามด้วย

4.3.2 ผลของพีเอชต่อการชะละลายของเหล็กที่หลุดออกจากตัวดูดซับขณะทำการดูดซับ

ระดับพีเอชในสารละลายโลหะนอกจากจะมีผลต่อการดูดซับแล้วยังส่งผลต่อการชะละลายของเหล็กที่เคลือบอยู่บนผิวของตัวดูดซับด้วย จากการทดลองเมื่อใช้ตัวดูดซับในสารละลายที่มีค่าพีเอชตั้งแต่ 1-9 พบว่าเหล็กที่เคลือบอยู่บนผิวของกากตะกอนจะถูกชะออกมาในปริมาณมากเมื่อ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า โดยที่พีเอชของสารละลายโลหะ

เท่ากับ 1 และ 2 เหล็กจะถูกชะออกมาจากตัวดูดซับสูงถึง 57-60 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ และ 3-6 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ แต่เมื่อพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 3 หรือสูงกว่า พบว่ามีเหล็กหลุดออกมาน้อยมากจนตรวจวัดไม่ได้ด้วยเครื่อง FAAS ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งการชะหลุดของเหล็กจำนวนมากจากตัวดูดซับที่พีเอช 1 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของตัวดูดซับลดลงด้วย ดังผลที่แสดงในรูป 4.9

ดังนั้นในการดูดซับโลหะออกจากน้ำด้วยกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ควรนำตัวดูดซับไปใช้เมื่อน้ำมีพีเอชสูงกว่า 3 เพื่อประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีและเพื่อป้องกันการถูกชะละลายของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนผิวของกากตะกอน



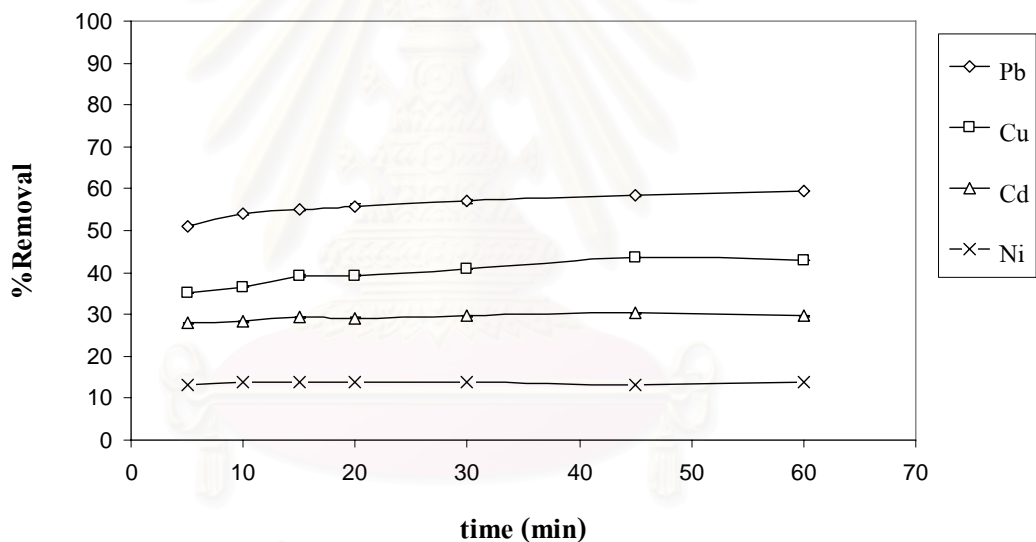
รูปที่ 4.10 ปริมาณเหล็กที่ถูกชะออกจากตัวดูดซับในสารละลายโลหะชนิดต่างๆ ขณะใช้ตัวดูดซับทำการดูดซับโลหะที่พีเอชต่างๆ

4.3.3 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะ

การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ในการดูดซับไอออนของโลหะที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างกัน โดยระยะเวลาที่ใช้ศึกษา คือที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และที่เวลา 60 นาที สำหรับการดูดซับโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.01 กรัม ในสารละลาย 10 มิลลิลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล คือ 30.8, 20.4, 20.9 และ 19.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.11

ผลจากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วและทองแดงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5-10 นาทีแรกและหลังจากนั้น จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20-30 นาที ส่วนการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5 นาที และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที โดยความสามารถสูงสุดการดูดซับตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล คือ ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที สามารถดูดซับได้ 33.7, 12.8, 7.9 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ดังนั้นระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะจึงไม่ควรต่ำกว่า 30 นาทีสำหรับตะกั่วและทองแดง และไม่ควรต่ำกว่า 10 นาทีสำหรับแคดเมียมและนิกเกิล แต่ในการศึกษาขั้นต่อ ๆ ไปจะเลือกใช้ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายโลหะเป็นเวลา 60 นาที ทั้งนี้เพื่อให้การดูดซับโลหะเข้าสู่สมดุลและเกิดขึ้นได้มากที่สุด



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ

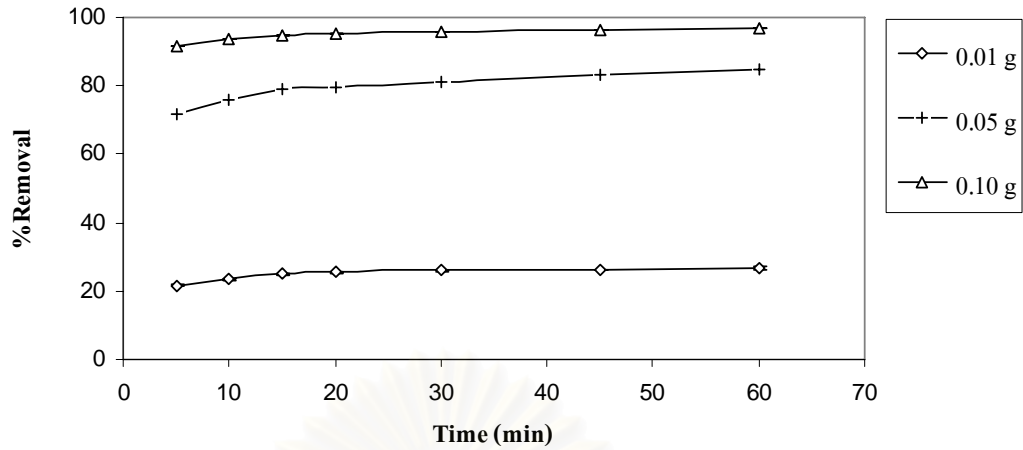
4.3.4 ผลของปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ และจลนศาสตร์การดูดซับ

4.3.4.1 ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้

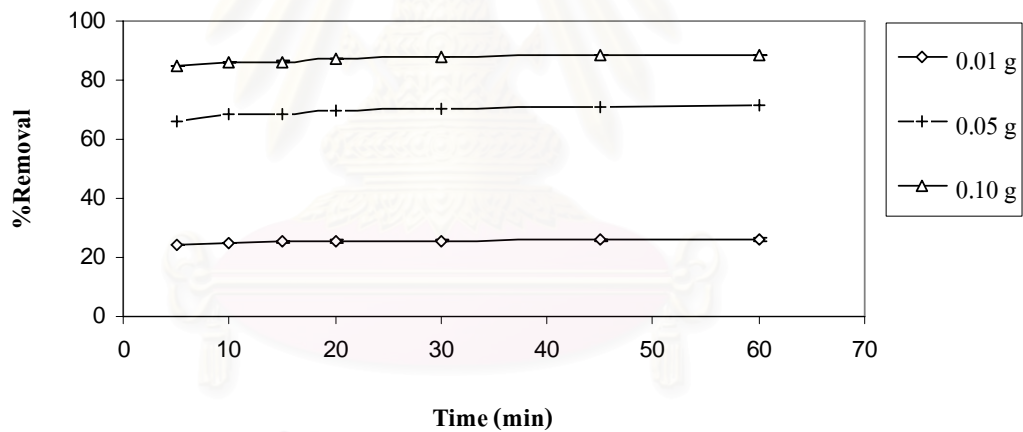
ศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะ โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับที่ใช้กับระยะเวลาในการสัมผัสกับสารละลายโลหะโดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ คือ 0.01, 0.05 และ 0.10 กรัม สำหรับสารละลาย 10 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นความเข้มข้นของตัวดูดซับเท่ากับ 1, 5 และ 10 กรัมต่อลิตร และระยะเวลาที่ใช้สัมผัส คือ ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที โดยควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะเท่ากับ 48.3, 98.8, 30.5 และ 19.9 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม และ นิกเกิล ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับระหว่างปริมาณตัวดูดซับที่ใช้กับระยะเวลาในการสัมผัส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดก็จะสูงขึ้นด้วย และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ถึง 4.15 แต่เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการดูดซับพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับมากขึ้นความสามารถในการดูดซับหรือจำนวนมิลลิกรัมของโลหะที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับทำให้สัดส่วนของความเข้มข้นของสารละลายต่อปริมาณตัวดูดซับลดลง ซึ่งส่งผลให้สมดุลของสารละลายเปลี่ยนไปด้วย ทำให้เกิดแรงขับ (driving force) ระหว่างสารละลายโลหะกับตัวดูดซับลดลงดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และการดูดซับเกิดไม่เต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้งหมดที่มี (unsaturation) เมื่อเทียบเป็นประสิทธิภาพการดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ ค่าที่ได้จึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น (Bulut และคณะ, 2007)

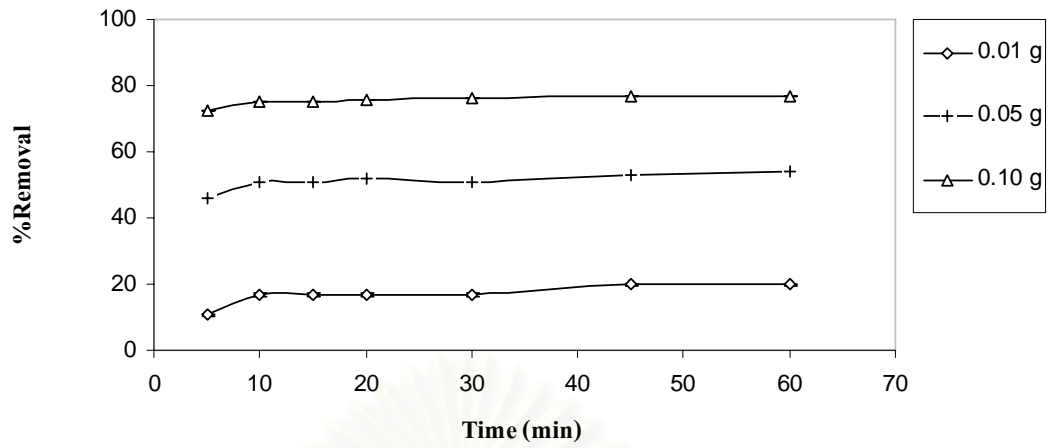
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



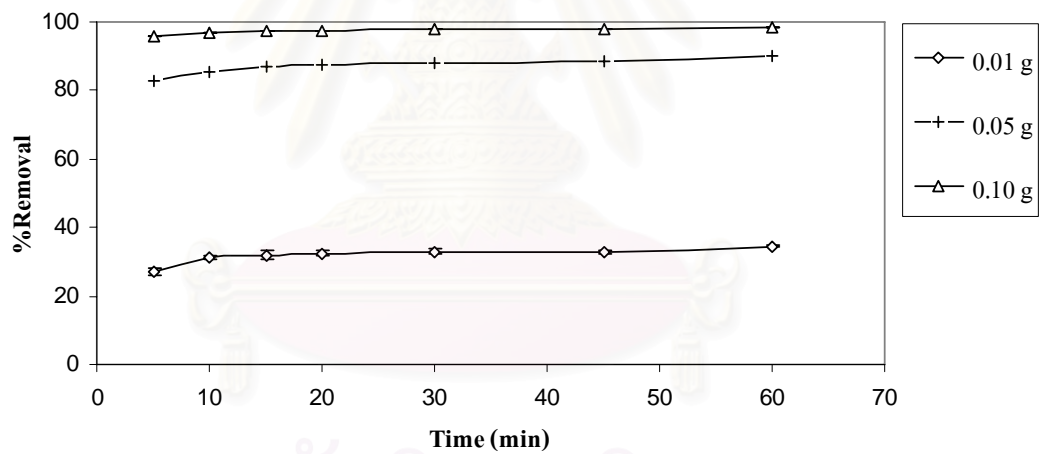
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ใช้ตัวดูดซับหนัก 0.01, 0.05, 0.10 กรัม และ ระยะเวลาในการสัมผัส 5-60 นาที

4.3.4.2 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

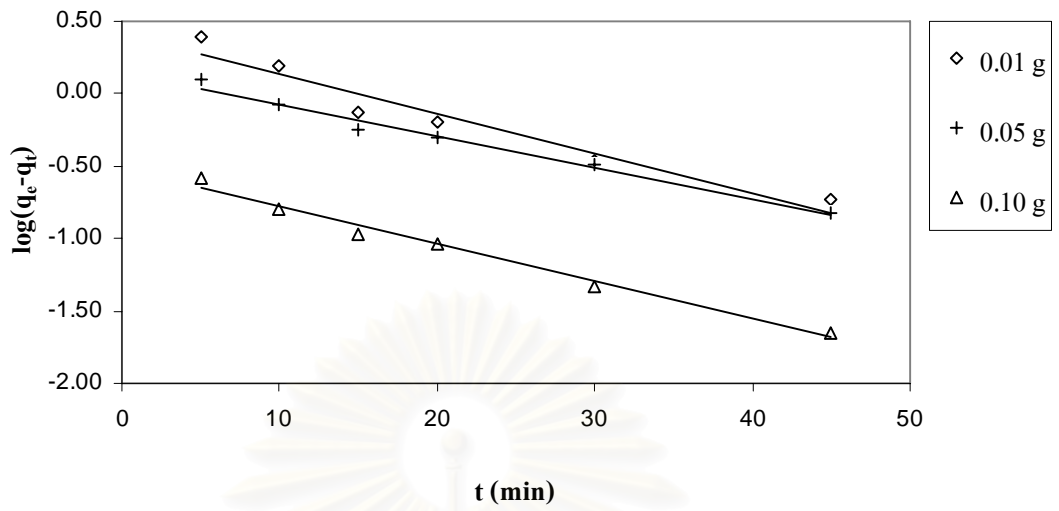
ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของโลหะทองแดง แคลเซียม นิกเกิล และ ตะกั่ว ด้วยตัวดูดซับที่เป็นกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้แบบจำลอง Pseudo-first order ของ Lagergren และ Pseudo-second order ในการคำนวณเพื่ออธิบายกลไกและอัตราเร็วในการดูดซับ โดยทำการศึกษาการดูดซับสารละลายโลหะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคงที่แต่เพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับช่วง 5 – 60 นาที แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่การดูดซับตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order (Ho และ Mckay, 2003) ตามสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4.1)$$

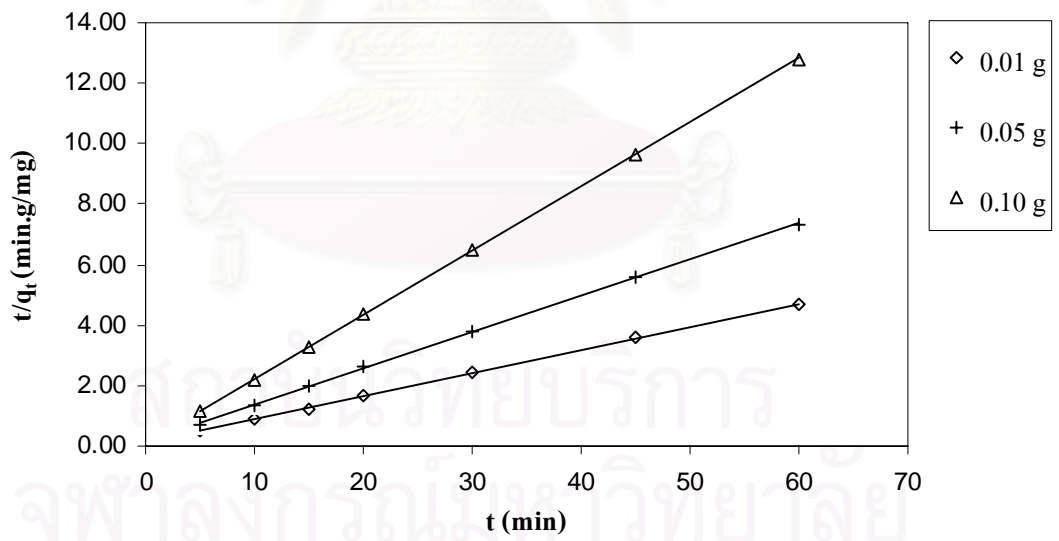
- โดย q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- q_t = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- t = ระยะเวลาในการดูดซับ มีหน่วยเป็นนาที (min)
- k_1 = ค่าคงที่การดูดซับของ pseudo-first order มีหน่วยเป็น 1 ต่อ นาที (1/min)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.2)$$

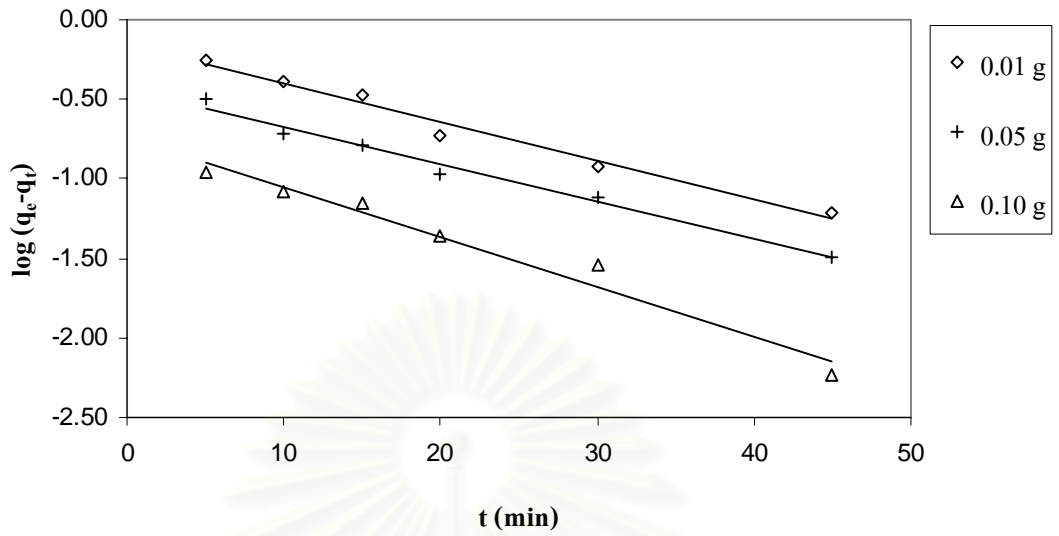
- โดย q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- q_t = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- t = ระยะเวลาในการดูดซับ มีหน่วยเป็นนาที (min)
- k_2 = ค่าคงที่การดูดซับของ pseudo-second order มีหน่วยเป็น g/mg.min



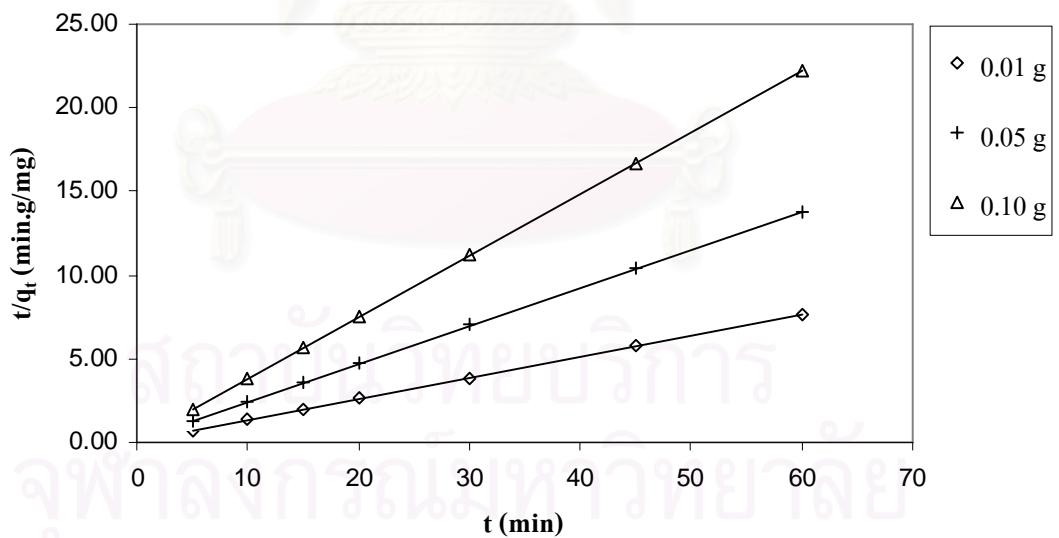
รูปที่ 4.16 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของทองแดงที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



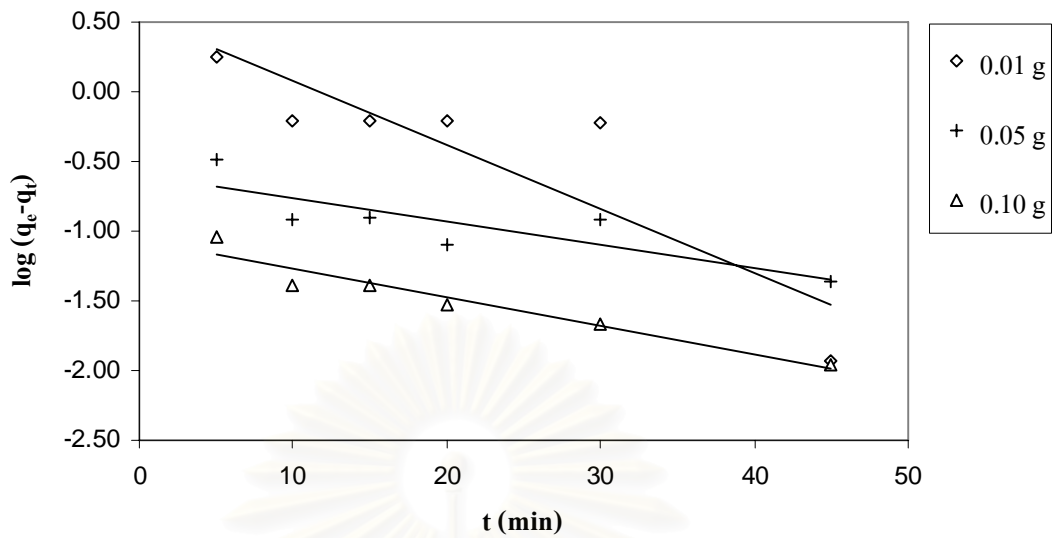
รูปที่ 4.17 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของทองแดงที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



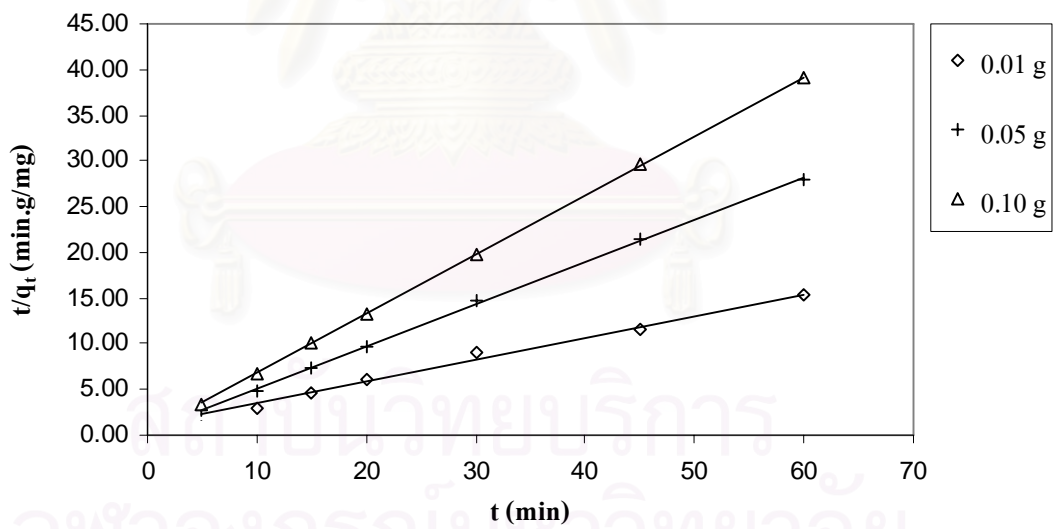
รูปที่ 4.18 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



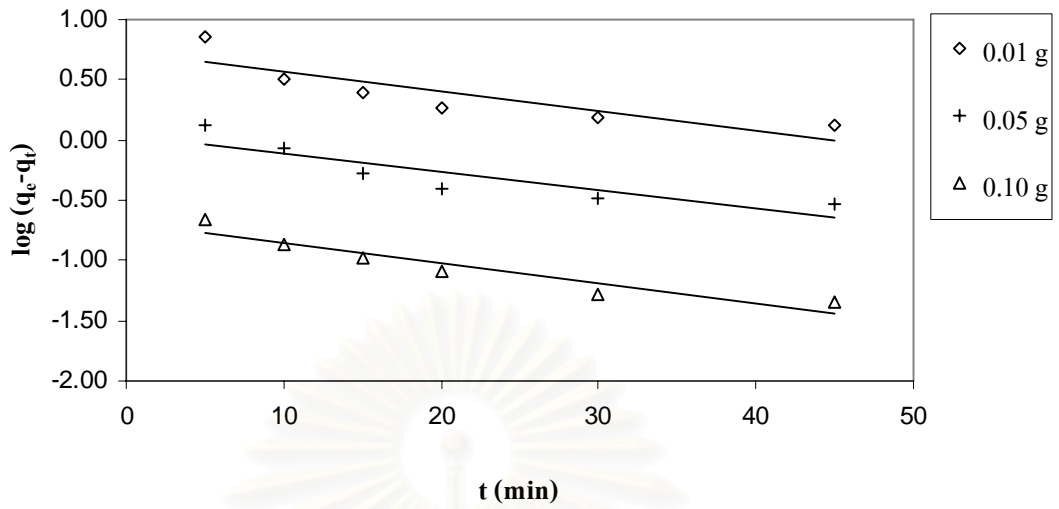
รูปที่ 4.19 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



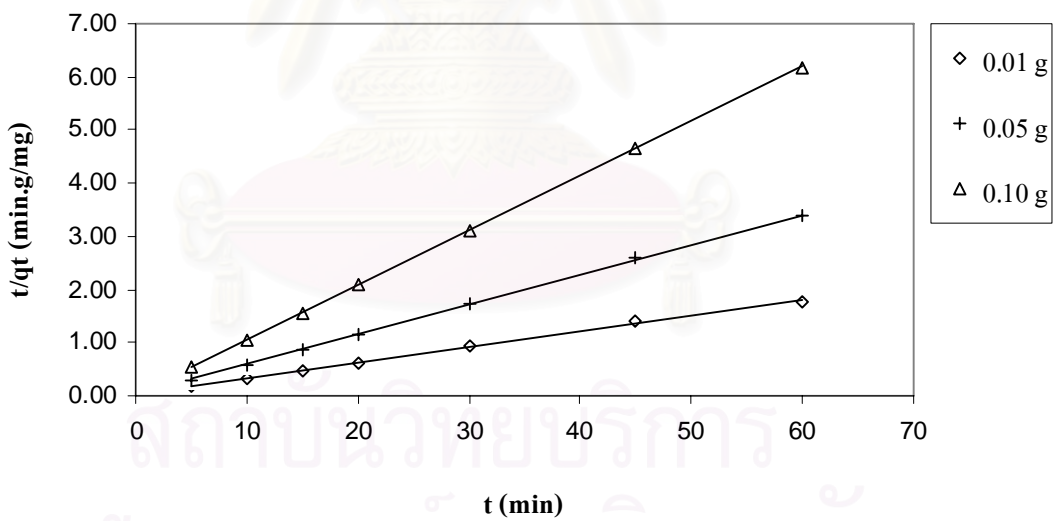
รูปที่ 4.20 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของนิกเกิลที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.21 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของนิกเกิลที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.22 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first order ของตะกั่วที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.23 จลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order ของตะกั่วที่ถูกดูดซับโดยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-first order และ pseudo-second order ที่คำนวณจากสมการเส้นตรงของกราฟ

Metal	Adsorbent dose (g)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
			k_1 (1/min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg.min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
Cu ²⁺	0.01	12.76	6.33×10^{-2}	2.61	0.9435	5.26×10^{-2}	13.04	0.9999
	0.05	8.18	5.02×10^{-2}	1.40	0.9842	8.67×10^{-2}	8.32	0.9998
	0.10	4.69	5.92×10^{-2}	3.37	0.9837	5.01×10^{-1}	4.71	1
Cd ²⁺	0.01	7.87	5.64×10^{-2}	1.42	0.9811	1.96×10^{-1}	7.94	1
	0.05	4.35	5.39×10^{-2}	2.77	0.9841	3.79×10^{-1}	4.39	1
	0.10	2.71	7.1×10^{-2}	5.48	0.9674	9.41×10^{-1}	2.72	1
Ni ²⁺	0.01	3.92	1.05×10^{-1}	3.40	0.7706	5.17×10^{-2}	4.19	0.9927
	0.05	2.15	3.78×10^{-2}	4.03	0.7043	4.25×10^{-1}	2.17	0.9994
	0.10	1.53	8.52×10^{-2}	2.53	0.9253	1.42	1.58	1
Pb ²⁺	0.01	33.65	3.68×10^{-2}	5.27	0.7534	1.99×10^{-2}	34.01	0.9993
	0.05	17.72	3.57×10^{-2}	1.12	0.7731	1.02×10^{-1}	17.79	0.9999
	0.10	9.70	3.82×10^{-2}	4.90	0.8928	5.89×10^{-1}	9.71	1

$q_{e,exp}$ คือ ความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง

$q_{e,cal}$ คือ ความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.5 แสดงถึงค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-first order และ pseudo-second order ที่คำนวณจากสมการเส้นตรงของกราฟ ซึ่งพบว่าสมการดูดซับของโลหะทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว เป็นไปตามจลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-second order แม้ว่าสำหรับบางกรณี ค่า R^2 สำหรับการพล็อตแบบ Pseudo-first order จะมีค่าสูง แต่เมื่อพิจารณาจากค่า q_e ทั้งหมดที่คำนวณได้ ($q_{e,cal}$) จากสมการของ Pseudo-first order แล้วพบว่า ไม่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ($q_{e,exp}$) ในขณะที่ค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ Pseudo-second order มีค่าใกล้เคียงกับค่า q_e ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองมาก ซึ่งแสดงให้เห็น

เห็นว่าการดูดซับไอออนของโลหะด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์น่าจะมีพฤติกรรมดังนี้ (Ho และ McKay, 2000)

- เกิดการดูดซับไอออนเพียงชั้นเดียวบนผิวตัวดูดซับ
- พลังงานการดูดซับไอออนในระบบขึ้นกับพื้นผิวของตัวดูดซับ
- เกิดการดูดซับเฉพาะที่ผิวของตัวดูดซับ และไม่ดูดซับ หรือเกิดพันธะระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกัน
- อัตราเร็วในการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้นของการดูดซับ และจะค่อย ๆ เกิดอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไป

ค่า k_2 ในตารางที่ 4.5 เป็นค่าคงที่ของ pseudo-second order ที่บอกลึถึงอัตราเร็วในการดูดซับซึ่งหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t ถ้าค่า k_2 มากก็แสดงว่าอัตราเร็วในการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่า k_2 ที่มีค่าน้อย ๆ จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้นพบว่าค่า k_2 ของการดูดซับทองแดง แคลเซียม นิกเกิล และตะกั่ว ก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่ได้ (รูป 4.12 – 4.15)

4.3.5 ผลของไอออนรบกวน

เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติ หรือแหล่งน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีปริมาณของไอออนอื่นเป็นองค์ประกอบที่นอกเหนือจากไอออนของโลหะ ฉะนั้นการนำกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้ในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงผลของไอออนอื่น ๆ ด้วย ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการเติมเกลือโซเดียมไนเตรท (NaNO_3), แคลเซียมไนเตรท ($\text{Ca(NO}_3)_2$) และ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งเป็นการเติมแคทไอออน และแอนไอออนลงไปได้น้ำ ได้แก่ Na^+ , Ca^{2+} , NO_3^- และ SO_4^{2-} โดยให้ไอออนเหล่านี้เป็นตัวแทนของแคทไอออน และแอนไอออนที่มีอยู่จริงในน้ำ โดยเติมความเข้มข้นของเกลือแต่ละชนิดเป็น 0.01 M และ 0.50 M โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง แคลเซียม และนิกเกิล เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.6 เมื่อเติมเกลือ NaNO_3 , $\text{Ca(NO}_3)_2$ และ Na_2SO_4 ลงไปในสารละลายโลหะ พบว่าเกลือเหล่านี้มีผลทำให้กากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับไอออนของโลหะได้ลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือเข้าไปอีกก็ยิ่งทำให้ความสามารถ

ในการดูดซับลดลงเรื่อย ๆ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแข่งขันระหว่างแคทไอออนที่เติมลงไปในการละลายกับไอออนของโลหะซึ่งมีประจุเป็นบวกเหมือนกัน ในการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และนอกจากนี้พื้นผิวเหล็กออกไซด์ที่สามารถจับกับไอออนต่าง ๆ ในสารละลายด้วยกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ไม่มีความจำเพาะในการเลือกจับกับไอออนในสารละลาย ดังนั้นในสารละลายโลหะที่มีเกลือ NaNO_3 , $\text{Ca(NO}_3)_2$ และ Na_2SO_4 ละลายอยู่ในปริมาณที่มากจึงทำให้ตัวดูดซับสามารถจับกับไอออนของโลหะได้น้อยลง

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซนต์การดูดซับตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิลเมื่อมีเกลือต่าง ๆ ในสารละลาย

Interfering ion	Concentration (M)	% Removal ^b			
		Pb ²⁺	Cu ²⁺	Cd ²⁺	Ni ²⁺
Blank	0.00	59.7 ± 0.2	41.8 ± 0.1	25.4 ± 0.2	14.2 ± 0.3
NaNO ₃	0.01	56.7 ± 0.03	43.9 ± 0.1	25.4 ± 0.03	12.2 ± 0.3
	0.50	42.7 ± 0.2	38.7 ± 0.2	20.9 ± 0.02	5.5 ± 0.3
Ca(NO ₃) ₂	0.01	48.6 ± 0.3	35.2 ± 0.4	15.9 ± 0.1	1.0 ± 0.3
	0.50	38.3 ± 0.8	24.6 ± 0.1	8.0 ± 0.2	0.8 ± 0.3
Na ₂ SO ₄	0.01	- ^a	39.5 ± 0.2	17.4 ± 0.03	7.5 ± 0.3
	0.50	- ^a	27.2 ± 0.2	9.2 ± 0.2	6.2 ± 0.6

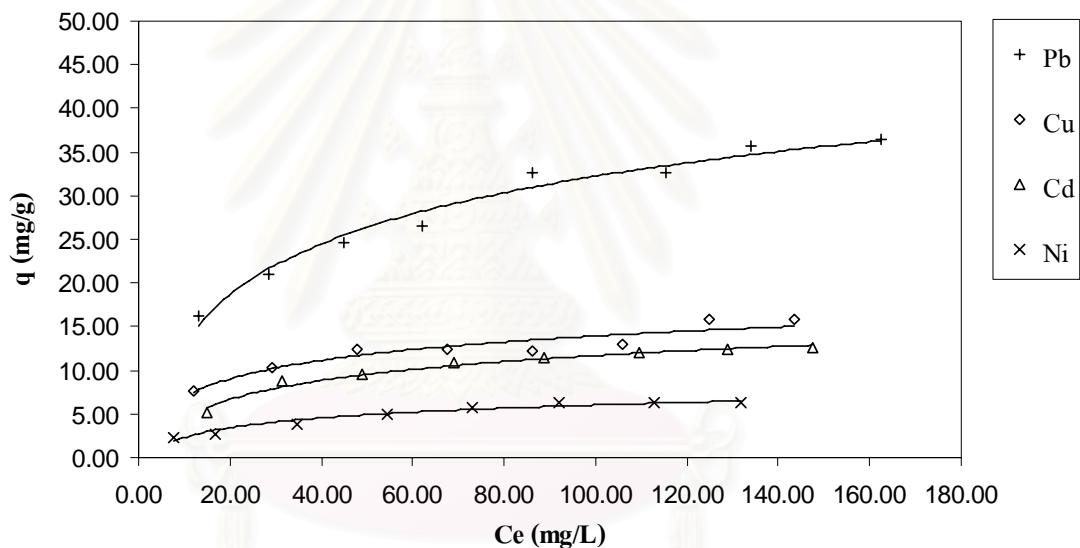
^a ไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของ PbSO_4 ซึ่งสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

^b ค่าเฉลี่ย ± S.D. (n = 3)

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าในสารละลายโลหะที่มีเกลือละลายอยู่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ ดังนั้นหากต้องการนำกากตะกอนที่เคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้ดูดซับโลหะในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือในแหล่งน้ำอื่น ๆ ที่มีเกลือละลายอยู่ในปริมาณที่มากจึงอาจไม่เหมาะสมนัก แต่ควรนำไปใช้กับน้ำที่มีปริมาณเกลือไม่สูงมากนัก เช่น แหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำประปา หรือแหล่งน้ำอื่น ๆ ที่มีการปนเปื้อนของโลหะ

4.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะออกจากน้ำ ทำการทดลองโดยเลือกใช้ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักที่ได้ศึกษาในข้อ 4.3 คือ ทำในระบบกะ (batch) ที่อุณหภูมิ 25 °C ใช้ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที พีเอชของสารละลายโลหะทองแดง แคดเมียม และนิกเกิลเลือกใช้ที่พีเอช 5 ส่วนสารละลายโลหะตะกั่วทำที่พีเอช 4 โดยชั่งกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์มา 0.01 กรัมแล้วเติมสารละลายโลหะแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรจากนั้นนำไปเขย่า และแยกเอาสารละลายไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะที่เหลือด้วยเครื่อง FAAS ได้ผลดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ (q) โลหะกับความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ หรือความเข้มข้นที่สมดุล (C_e) ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 สมดุลการดูดซับโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

จากรูปที่ 4.24 แสดงถึงสมดุลของการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้นและเริ่มมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลการดูดซับ และจากการทดลองสามารถนำมาคำนวณสมการเชิงเส้นเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับระหว่างตัวดูดซับที่เป็นของแข็งกับตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลวได้ (รูปที่ 4.25 และ 4.26) โดยใช้สมการไอโซเทอมการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์ และแบบจำลองของฟรุนด์ลิช ในการอธิบาย ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$\frac{C_e}{q} = \left(\frac{1}{bq_m} \right) + \left(\frac{C_e}{q_m} \right) \quad (4.3)$$

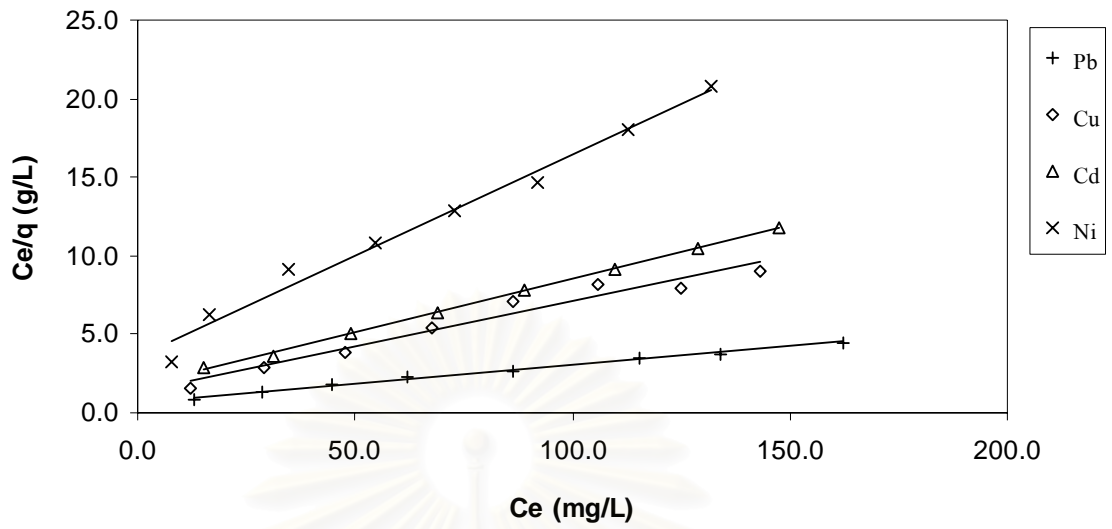
- โดย C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
- q = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- q_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับได้สูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- b = ค่าคงที่พลังงานของระบบ

สามารถคำนวณหาค่า q_m และค่า b ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e โดยคำนวณจากสมการเส้นตรง ดังรูปที่ 4.25

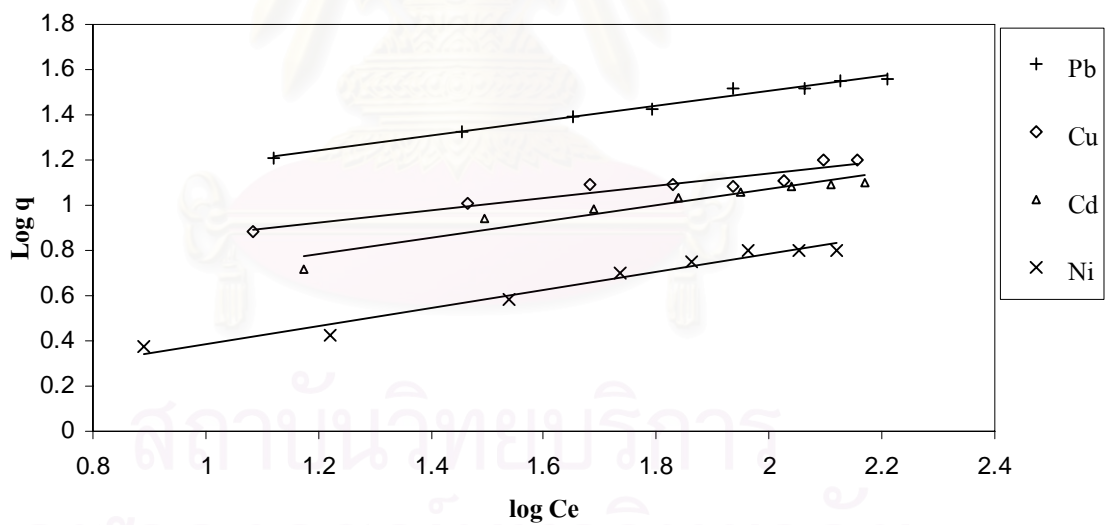
$$\log q = \log K_f + \frac{1}{n} (\log C_e) \quad (4.4)$$

- โดย C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
- q = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
- K_f = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ
- n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของระบบ

สามารถคำนวณหาค่า K_f และค่า n ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ โดยคำนวณจากสมการเส้นตรง ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 สมดุลการดูดซับ โลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วจากน้ำตามแบบจำลองแลงเมียร์



รูปที่ 4.26 สมดุลการดูดซับ โลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วจากน้ำตามแบบจำลองฟรูนด์ลิช

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล

Metal ion	Langmuir constants				Freundlich constants		
	q_m (mg/g)	q_m (mmol/g)	b (L/mg)	R^2	K_f	n	R^2
Pb	42.4	0.20	0.006	0.9901	6.96	3.02	0.9869
Cu	17.3	0.27	0.034	0.9576	8.33	3.68	0.9204
Cd	14.7	0.13	0.053	0.9986	2.23	2.77	0.9229
Ni	7.8	0.13	0.188	0.9845	1.02	2.52	0.9701

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.7 แสดงถึงค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับของ ตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิลโดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ พบว่า สมดุลการดูดซับของโลหะทั้ง 4 ชนิด เป็นไปตามความสัมพันธ์ของแลงเมียร์มากกว่าของฟรุนด์ลิช เนื่องจากมีค่า R^2 ที่สูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ผิว ของตัวดูดซับ (Monolayer adsorption) สังเกตได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์การดูดซับในรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งผล การทดลองในส่วนนี้มีความสอดคล้องกับผลของจลนศาสตร์การดูดซับดังที่ได้ศึกษาไปแล้วใน ข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.3.4.2 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าการดูดซับไอออนของโลหะทั้ง 4 ชนิดด้วยกาก ตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าคงที่ของไอโซเทอม จะพบว่าค่าความสามารถในการดูด ซับของโลหะทองแดงมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด (พิจารณาจากค่า q_m และค่า K_f) รองลงมา คือ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

Adsorbent	Maximum sorption capacity [q_{\max} (mmol/g)]	pH	Reference
Iron oxide coated sewage sludge	Cu (0.272), Pb (0.205), Ni (0.132), Cd (0.130)	5.0	งานวิจัยนี้
Iron oxide coated waste silica	Ni (0.072), Cu (0.053), Pb (0.039) Cd (0.038)	5.5-7.0	Unob et al. (2007)
sewage sludge ash	Cu (0.052, 0.065)	4.0	Pan et al. (2003)
sewage sludge (chemical pyrolysis)	Ni (0.155), Cd (0.149)	5.8	Zhai et al. (2004)
Granular activated carbon	Cu (0.043), Cd (0.022)	5.4-5.7	Üçer et al. (2006)
<i>Caulerpa lentillifera</i>	Pb (0.142), Cu (0.13), Cd (0.042)	5.0	Apiratikul and Pavasant (2007)

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม จากตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ของงานวิจัยฉบับนี้เทียบกับตัวดูดซับจากงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าสามารถดูดซับโลหะทั้งสี่ชนิดได้ดีกว่าตัวดูดซับที่เตรียมจาก ซิลิกาเคลือบเหล็กออกไซด์, Granular activated carbon, *Caulerpa lentillifera* และตัวดูดซับที่เตรียมจากเถ้าของกากตะกอน และพบว่าความสามารถในการดูดซับนิกเกิลกับแคดเมียม มีค่าใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนที่ผ่านกระบวนการ chemical pyrolysis

4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะจากตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนสามแหล่ง คือ โรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร โรงควบคุมคุณภาพน้ำห้วยขวาง และโรงควบคุมคุณภาพน้ำชองนนทบุรี โดยนำกากตะกอนจากทั้งสามแหล่งมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ตามภาวะที่เหมาะสม ในข้อ 4.1 และนำมาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้สารละลายทองแดงความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นตัวแทนของสารละลายโลหะ โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ แล้วคำนวณค่าทางสถิติ โดยใช้ Pair T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์เพื่อหาความแตกต่างของการดูดซับจากตัวดูดซับที่เตรียมจากต่างแหล่ง ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงโดยตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนที่นำมาจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร ห้วยขวาง และน้ำชองนนทบุรีที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง

แหล่งที่มาของกากตะกอน	ความสามารถในการดูดซับ ^a (mg/g)		
	กากตะกอนอบ และเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์	กากตะกอนอบ แต่ไม่เคลือบ	กากตะกอนไม่อบ และไม่เคลือบ
จตุจักร	8.4 ± 0.1	3.3 ± 0.2	5.2 ± 0.2
ห้วยขวาง	6.1 ± 0.2	3.0 ± 0.3	3.5 ± 0.7
ชองนนทบุรี	6.7 ± 0.1	3.0 ± 0.1	4.4 ± 0.1

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=5)

ผลจากการทดลองการเตรียมตัวดูดซับโดยเคลือบเหล็กออกไซด์จากกากตะกอนทั้งสามแหล่งพบว่าความสามารถในการดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนทั้งสามแหล่งน่าจะมีลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน เมื่อนำมาอบที่ 300°C และเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แล้วจึงทำให้ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์กับตัวดูดซับที่นิยมใช้ทั่วไป

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะทั้งสี่ชนิด ได้แก่ ทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ เปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ Carbon Charcoal, Activated Carbon และตัวดูดซับที่เป็น Cation Resin ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะโดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ เปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่หาได้ง่าย

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความสามารถในการดูดซับ ^a (mg/g)			
		กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์	Carbon Charcoal	Activated Carbon	Cation Resin
ทองแดง	20.2	8.4 ± 0.1	2.0 ± 0.1	1.6 ± 0.2	8.9 ± 0.2
แคดเมียม	20.0	5.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.1	11.5 ± 0.6
นิกเกิล	19.6	2.7 ± 0.3	0.3 ± 0.5	0.4 ± 0.4	10.5 ± 0.7
ตะกั่ว	30.7	17.2 ± 0.1	5.3 ± 0.7	5.6 ± 0.5	24.3 ± 0.3

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=5)

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับโลหะของกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยผลการเปรียบเทียบการดูดซับโลหะกับตัวดูดซับชนิดอื่น ซึ่งพบว่ากากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว น้อยกว่าตัวดูดซับที่เป็น Cation resin อยู่มาก แต่มีค่าใกล้เคียงกับการดูดซับทองแดง โดยที่กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับทองแดงได้ 8.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วน Cation resin ดูดซับได้ 8.9 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับกับตัวดูดซับที่เป็น Carbon Charcoal และ Activated Carbon พบว่ากากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะทั้งสี่ชนิดได้ดีกว่าตัวดูดซับที่เป็น Carbon Charcoal และ Activated Carbon มาก โดย

ประสิทธิภาพในการดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อคำนวณด้วย pair t-test

ดังนั้นหากต้องการดูดซับโลหะจากน้ำที่มีทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วปนเปื้อน สามารถเลือกกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับแทน Carbon Charcoal และ Activated Carbon ได้ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงกว่า

4.7 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนของโลหะผสม

เนื่องจากในภาชนะน้ำเสียจริงอาจมีโลหะหลายชนิดปนเปื้อนอยู่ หากนำกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้ดูดซับโลหะในน้ำเสียจริงจะต้องคำนึงถึงภาวะของน้ำเสียจริงด้วย ดังนั้นการทดลองส่วนนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะผสมในน้ำ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ความเข้มข้นประมาณ 0.3 มิลลิโมลต่อลิตร ผสมอยู่ และปรับพีเอชให้เป็นพีเอช 4.97 ก่อนทำการทดลอง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับไอออนของโลหะทั้ง 4 ชนิดได้ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว คือ 0.07, 0.01, 0.003 และ 0.11 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะผสมโดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร เป็นตัวดูดซับ

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mmol/L)	ความสามารถในการดูดซับ ^a (mmol/g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
ทองแดง	0.29	0.068 ± 0.002	23.84
แคดเมียม	0.29	0.009	3.13
นิกเกิล	0.29	0.003	1.13
ตะกั่ว	0.25	0.109 ± 0.001	43.48

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3)

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีโลหะผสมกันหลายชนิดในน้ำเสีย ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะจะแตกต่างกันไปแต่ละชนิดของโลหะ ซึ่งจากการทดลอง กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่า ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ตามลำดับ

4.8 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริง

น้ำเสียจริงที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียที่มาจากห้องปฏิบัติการ ที่เก็บแยกไว้เป็นแต่ละชนิดของโลหะ ซึ่งน้ำเสียแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพสีมีตะกอนเล็กน้อย ไม่มีกลิ่น นำน้ำเสียที่มีโลหะแต่ละชนิดปนเปื้อนอยู่ไปวัดค่าพีเอช โดยค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีทองแดง แคลเดียม นิกเกิล และตะกั่ว ปนเปื้อนอยู่ได้พีเอชเท่ากับ 4.87, 4.53, 4.79 และ 3.67 ตามลำดับ จากนั้นนำไปวัดหาปริมาณโลหะแต่ละชนิดก่อนแล้วจึงนำน้ำเสียแต่ละชนิดมาผสมกัน จากนั้นนำน้ำเสียที่มีโลหะผสมอยู่ทั้งสี่ชนิดไปวัดค่าพีเอชแล้วปรับพีเอชของน้ำเสียด้วย NaOH 0.1 M ซึ่งได้ค่าพีเอชเท่ากับ 4.99 แล้วจึงนำน้ำเสียไปตรวจวัดหาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะด้วยเครื่อง FAAS ซึ่งพบว่าน้ำเสียมีความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง แคลเดียม นิกเกิล และตะกั่วเท่ากับ 19.9, 19.7, 19.5 และ 51.5 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ แล้วนำไปดูดซับด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์น้ำหนัก 0.01, 0.05 และ 0.10 กรัม ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.27

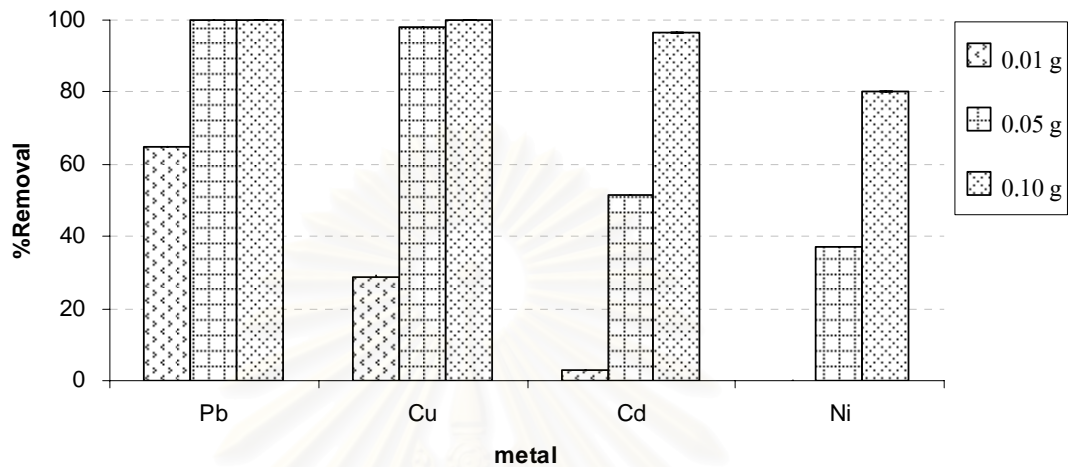
ตารางที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะจากน้ำเสียจริง

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความสามารถในการดูดซับ ^a (mg/g)		
		ตัวดูดซับ 0.01 g	ตัวดูดซับ 0.05 g	ตัวดูดซับ 0.10 g
ทองแดง	19.9	5.6 ± 0.3	3.9 ± 0.0	2.0 ± 0.0
แคลเดียม	19.7	0.6 ± 0.1	2.0 ± 0.0	1.9 ± 0.0
นิกเกิล	19.5	0.0 ± 0.0	1.4 ± 0.1	1.6 ± 0.0
ตะกั่ว	51.5	32.8 ± 1.1	10.3 ± 0.0	5.1 ± 0.0

^a ค่าเฉลี่ย ± SD (n=3) ซึ่งหากไม่แสดงค่า จะหมายความว่า SD = 0.0

ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3, 2539 ได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมต้องมีทองแดง แคลเดียม นิกเกิล และตะกั่วไม่เกิน 2.0, 0.03, 1.0 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.01 กรัม เพื่อดูดซับน้ำเสียที่มีโลหะทองแดง แคลเดียม นิกเกิล ความเข้มข้นประมาณ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และดูดซับตะกั่วความเข้มข้นประมาณ 52 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่สามารถดูดซับโลหะเหล่านี้ออกจากน้ำเสียให้เหลือตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้นเป็น 0.05 กรัมขึ้นไป พบว่าสามารถดูดซับทองแดงและตะกั่วออกจากน้ำเสียได้สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.27 และความเข้มข้นที่เหลือหลังทำการดูดซับมีปริมาณต่ำกว่าที่

กฎหมายกำหนด โดยความเข้มข้นของทองแดงและตะกั่วที่เหลือหลังทำการดูดซับมีปริมาณน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นแคดเมียมกับนิกเกิลที่ยังเหลือเกินเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นจะต้องเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้สูงกว่า 0.10 กรัม



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะในน้ำเสียจริงโดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ 0.01, 0.05 และ 0.10 กรัม เป็นตัวดูดซับ

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มาจากแหล่งอื่นอาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับภาวะและองค์ประกอบของน้ำเสีย เช่น ค่าพีเอช ปริมาณเกลือและสารอินทรีย์ เป็นต้น ฉะนั้นหากนำกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ไปใช้ดูดซับโลหะในน้ำเสียจริงจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ด้วยเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับจากกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม แล้วนำไปดูดซับไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วในน้ำ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

จากการศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยวิธี Modified Adsorption ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม คือ การทำให้สารละลายเหล็กตกตะกอนที่พีเอช 12 โดยใช้สารละลายเหล็กความเข้มข้น 2.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในปริมาตร 10 มิลลิลิตร เคลือบบนผิวของกากตะกอน 5 กรัม ที่ผ่านการอบมาแล้วที่ 300°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และใช้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายเหล็กและกากตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบที่ 105°C ซึ่งหลังจากเคลือบแล้วทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้เคลือบ

5.1.2 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

หลังจากทำการเคลือบเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวของกากตะกอนแล้วทำให้ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กกว่าของกากตะกอนเดิม คือ จาก 240 Å ลดลงเหลือ 92.5 Å ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวของกากตะกอนสูงขึ้นจากเดิม คือ จาก 0.0379 cm³/g เป็น 0.1371 cm³/g และ จาก 6.31 และ 59.26 m²/g ตามลำดับ และหลังจากการเคลือบพบเหล็กบนผิวของกากตะกอนมากขึ้นจากเดิม คือ จาก 24.6 เป็น 72.8 มิลลิกรัมเหล็กต่อกรัมกากตะกอน ซึ่งแสดงว่าเหล็กออกไซด์สามารถเคลือบอยู่บนผิวของกากตะกอนได้จริง

5.1.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์

ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วในน้ำ โดยใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ พบว่าพีเอชของสารละลายโลหะ ระยะเวลาในการสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ และไอออนอื่น ๆ ที่ละลายอยู่ในสารละลายโลหะ มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ ดังนี้

5.1.3.1 ระดับพีเอชของสารละลายโลหะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะแคดเมียม นิกเกิล คือ ที่พีเอช 7 ทองแดง ที่พีเอช 6 และตะกั่วที่พีเอช 5 โดยไม่ทำให้สารละลายโลหะตกตะกอน และพบการชะหลุดของเหล็กจากตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีพีเอชต่ำกว่า 3 ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

5.1.3.2 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโลหะ คือ 60 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่มีการดูดซับเข้าสู่สมดุล

5.1.3.3 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับให้สูงขึ้นจาก 0.01 กรัม เป็น 0.10 กรัม โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะเท่าเดิม พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น และเข้าสู่สมดุลการดูดซับเร็วขึ้น เมื่อคำนวณผลจลนศาสตร์การดูดซับพบว่า สมดุลการดูดซับของทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว เป็นไปตามความสัมพันธ์ของการดูดซับแบบ pseudo-second order

5.1.3.4 เมื่อเติมเกลือ NaNO_3 , $\text{Ca(NO}_3)_2$ และ Na_2SO_4 ลงไปในสารละลายโลหะมีผลทำให้กากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับไอออนของโลหะได้ลดลง และเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันระหว่างไอออนของเกลือและไอออนของโลหะหนักในการดูดซับกับตัวดูดซับ

5.1.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

จากผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช พบว่าการดูดซับโลหะทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว นั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการไอโซเทอมการดูด

แบบแลงเมียร์ และพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับของโลหะทองแดงมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดรองลงมา คือ ตะกั่ว แคลเซียม และนิกเกิล ตามลำดับ

5.1.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะจากตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนต่างแหล่ง

เมื่อเตรียมตัวดูดซับโดยเคลือบเหล็กออกไซด์จากกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำทิ้งชุมชนสามแหล่ง พบว่าประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะกากตะกอนทั้งสามแหล่งน่าจะมีลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน

5.1.6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมจากกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์กับตัวดูดซับที่นิยมใช้ทั่วไป

กากตะกอนที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง แคลเซียม นิกเกิล และตะกั่วที่ดีกว่า Carbon charcoal และ Activated carbon และน้อยกว่าตัวดูดซับที่เป็น Cation exchange resin

5.1.7 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนของโลหะผสม

เมื่อมีโลหะผสมกันหลายชนิดในน้ำ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแต่ละชนิดจะลดลงจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่มีโลหะเพียงชนิดเดียว และพบว่าในสารละลายโลหะผสม กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุด รองลงมา คือ ทองแดง แคลเซียม และนิกเกิล ตามลำดับ

5.1.8 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริง

กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับไอออนของโลหะในน้ำเสียที่มีโลหะผสมได้ เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.01 กรัมในสารละลายโลหะ 10 มิลลิลิตร พบว่าสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้มากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง แคลเซียม และนิกเกิล ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ให้ทนต่อภาวะของสารละลายที่เป็นกรดขณะนำไปใช้ในการดูดซับโลหะ เช่น ศึกษาภาวะการเคลือบกากตะกอนที่อุณหภูมิสูง ๆ เพื่อให้เหล็กออกไซด์ก่อตัวบนผิวของกากตะกอนเป็น Fe_2O_3 (hematite) เพื่อเพิ่มความเสถียรให้กับตัวดูดตัวดูดซับ เพื่อที่เหล็กออกไซด์จะไม่ถูกชะออกมาจากผิวตัวดูดซับขณะทำการดูดซับสารละลายโลหะที่มีความเป็นกรดมาก ๆ

5.2.2 ศึกษาการเคลือบโลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ บนผิวของกากตะกอน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของโลหะออกไซด์แต่ละชนิด

5.2.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะชนิดอื่น ๆ หรือการดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำเสียหลาย ๆ ประเภท

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- ณัชชานา แพอ่อน. 2548. การกำจัดแคะและนิกเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. 2547. การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปัทมาพร ยอดสันติ. 2543. ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกับปริมาณแคะเมี่ยมตะกั่ว และปรอท ในภาคตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยาและห้วยขวาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานพ ตีระรัตนสมโภช. 2545. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิราณี ศิริสุขโขดม. 2535. ผลของภาคตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักในพืชผัก บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม จังหวัดปทุมธานี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภฤกษ์ สีนสุพรรณ. 2526. การประปาและการควบคุมมลภาวะ. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุชาดา สุทธิพิบูลย์. 2547. ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัจฉรีย์ กาญจนพิบูลวงศ์. 2544. การกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Apiratikul, R., and Pavasant, P. 2007. Batch and column studies of biosorption of heavy metals by *Caulerpa lentillifera*. Bioresource Technology.
- Bulut, Y., Gozubenli, N., and Aydin, H. 2007. Equilibrium and kinetics studies for adsorption of direct blue 71 from aqueous solution by wheat shells. Journal of Hazardous Materials. 144: 300-306.
- Calvo, L.F., Otero, M., Morán, A., and García, A.I. 2001. Upgrading sewage sludge for adsorbent preparation by different treatments. Bioresource Technology. 80: 143-148.
- Chen, X., Jeyaseelan, S., and Graham, N. 2002. Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge. Waste Management. 22: 755-760.
- Choo, K., and Kang, S. 2003. Removal of residual organic matter from secondary effluent by iron oxides adsorption. Desalination. 154: 139-146.
- Dzombak, D.A. and M.M. Morel, F. 1990. Surface complexation modeling hydrous ferric oxide. New York: John Wiley & Sons.
- Gascó, G., Méndez, A., and Gascó, J.M. 2005. Preparation of carbon-based adsorbents from sewage sludge pyrolysis to remove metals from water. Desalination. 180: 245-251.
- Gupta, V.K., Saini, V.K. and Jain, N. 2005. Adsorption of As(III) from aqueous solutions by iron oxide-coated sand. Journal of Colloid and Interface Science. 288: 55-60.
- HO, Y. S., and McKAY, G. 2000. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. Water Research. 34: 735-742.
- HO, Y. S., and McKAY, G. 2003. Sorption of dyes and copper ions onto biosorbents Process. Biochemistry. 38: 1047-1061.
- Koretsky, C. 2000. The significance of surface complexation reactions in hydrologic systems: a geochemist's perspective. Journal of Hydrology. 230: 127-171.
- Lai, C.H., Chen, C.Y., Shih, P.H., and Hsia, T.H. 2000. Competitive adsorption of copper and lead ions on an iron-coated sand from water. Water Science and Technology. 42:149-154.
- Mayers, D. 1999. Surfaces, Interfaces, and Colloids. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Montgomery, J.M. 1985. Water Treatment Principles & Design. New York: John Wiley & Sons.

- Ngan, W.S.W., Kamari, A., and Koay, Y.J. 2004. Equilibrium and kinetics studies of adsorption of copper (II) on chitosan and chitosan/PVA beads. International Journal of Biological Macromolecules. 34: 155–161.
- O'Neill, P. 1993. Environmental chemistry. 2nd ed. London: Chapman & Hall.
- Otero, M., Rozada, F., Calvo, L.F., García, A.I., and Morán, A. 2003. Kinetic and equilibrium modelling of the methylene blue removal from solution by adsorbent materials produced from sewage sludges. Biochemical Engineering Journal. 15: 59-68.
- Pan, S.-C., Lin, C.-C., and Tseng, D.-H. 2003. Reusing sewage sludge ash as adsorbent for copper removal from wastewater. Resources, Conservation and Recycling. 39: 79-90
- Peng, X., Luan, Z., Di, Z., Zhang, Z., and Zhu, C. 2005. Carbon nanotubes-iron oxides magnetic composites as adsorbent for removal of Pb(II) and Cu(II) from water. Carbon. 43: 855-894.
- Ros, A., Lillo-Ródenas, M.A., Fuente, E., Montes-Morán, M.A., Martín, M.J., and Linares-Solano, A. 2006. High surface area materials prepared from sewage sludge based precursors. Chemosphere. 65: 132-140.
- Rozada, F., Otero, M., Morán, A., and García, A.I. 2005. Activated carbons from sewage sludge and discarded tyres: Production and optimization. Journal of Hazardous Materials. B124: 181-191.
- Scheidegger, A., Borkovec, M., and Sticher, H. 1993. Coating of silica sand with goethite: preparation and analytical identification. Geoderma, 58: 43-65.
- Schroeder, E.D. 1977. Water and Wastewater Treatment. International Student Edition. New York: McGraw-Hill.
- Üçer, A., Uyanik, A., Aygün, S.F. 2006. Adsorption of Cu(II), Cd(II), Zn(II), Mn(II) and Fe(III) ions by tannic acid immobilized activated carbon. Separation and Purification Technology 47 (3): 113–118.
- Unob, F., Wongsiri, B., Phaeon, N., Puanngam, M., and Shiowatan, J. 2007. Reuse of waste silica as adsorbent for metal removal by iron oxide modification. Journal of Hazardous Materials. 142: 455–462
- USEPA. Method 3050B Acid digestion of sediments, sludges, and soils[Online]. (n.d.). Available from: <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/350b.pdf> [2007, May 1]
- Vanloon, G.W., and Duff, S.J. 2001. Environmental chemistry. Oxford: Oxford University.

- Yu, L., and Zhong, Q. 2006. Preparation of adsorbents made from sewage sludges for adsorption of organic materials from wastewater. Journal of Hazardous Materials. B137: 359-366.
- Zeng, L. 2003. A method for preparing silica-containing iron (III) oxide adsorbents for arsenic removal. Water Research. 37: 4351-4358.
- Zhai, Y., Wei, X., Zeng, G., Zhang, D., and Chu, K. 2004. Study of adsorbent derived from sewage sludge for the removal of Cd^{2+} , Ni^{2+} in aqueous solutions. Separation and Purification Technology. 38: 191-196.
- Zhang, F., Nriagu, J.O., and Itoh, H. 2005. Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge. Water Research. 39(2-3): 389-395.
- Zhang, F., and Itoh, H. 2005. Iron oxide-loaded slag for arsenic removal from aqueous system. Chemosphere. 60: 319-325.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการทำซ้ำของวิธีการเคลื่อนเหล็กออกไซด์ (Repeatability)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบการการทำซ้ำของวิธีการเคลื่อนเหสีกอกไซด์ (Repeatability)

ตัวอย่าง ที่	Adsorption Capacity (mg/g)			ค่าทางสถิติ				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	SD	S^2	F_{cal}	F_{table}
1	18.0	17.9	17.9	17.9	0.0	0.002	15.1	19.0
2	15.9	16.0	16.0	16.0	0.1	0.003	9.3	19.0
3	15.1	15.3	15.5	15.3	0.20	0.040	1.5	19.0
4	16.1	16.2	16.2	16.2	0.07	0.005	5.4	19.0
5	15.8	16.0	15.69	15.8	0.14	0.018	1.4	19.0
6	16.2	15.7	15.9	16.0	0.25	0.060	2.3	19.0
7	17.0	16.8	16.62	16.8	0.22	0.046	1.8	19.0
8 ^a	16.4	16.2	16.12	16.3	0.16	0.026	1.0	19.0
9	16.8	16.6	16.22	16.6	0.31	0.097	3.7	19.0
10	17.6	17.5	17.34	17.5	0.13	0.017	1.5	19.0
11	16.8	16.5	16.71	16.7	0.13	0.016	1.6	19.0
12	16.3	17.0	16.52	16.6	0.39	0.153	5.9	19.0
13	16.3	16.6	16.78	16.6	0.25	0.065	2.5	19.0
14	15.6	16.2	15.98	15.9	0.30	0.088	3.4	19.0
15	16.3	16.3	16.06	16.2	0.12	0.013	2.0	19.0

^a ชุดตัวอย่างที่ใช้เปรียบเทียบเพื่อหาค่า F_{cal}

$$\text{เมื่อ } F_{cal} = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

$$F_{table} = 19.0$$



ภาคผนวก ข
ผลการศึกษาไอโซโทมของการดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ค่าความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Metal	Initial concentration C_i (mg/L)	Equilibrium concentration C_e (mg/L)	Adsorption capacity ^a q_e (mg/g)	%Removal
Cu	19.8	12.1	7.6 ± 0.1	38.6
	39.6	29.2	10.3 ± 0.3	26.2
	60.3	47.9	12.3 ± 1.5	20.5
	80.2	67.7	12.4 ± 0.5	15.7
	98.6	86.3	12.1 ± 0.4	12.4
	118.8	105.8	12.9 ± 0.5	10.9
	140.9	125.0	15.8 ± 0.8	11.3
	159.3	143.3	15.9 ± 2.0	10.0
Cd	20.2	15.0	5.2 ± 0.1	25.9
	40.2	31.3	8.7 ± 0.2	21.9
	58.6	48.9	9.6 ± 0.5	16.5
	79.8	68.9	10.8 ± 0.2	13.6
	100.2	88.9	11.4 ± 0.8	11.3
	121.8	109.7	12.0 ± 1.3	10.0
	141.1	128.7	12.3 ± 0.4	8.8
	160.1	147.4	12.5 ± 0.9	7.9

^a ค่าเฉลี่ย \pm SD (n = 3)

ตารางที่ ข-1 ค่าความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ด้วยกากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ต่อ)

Metal	Initial concentration C_i (mg/L)	Equilibrium concentration C_e (mg/L)	Adsorption capacity ^a q_e (mg/g)	%Removal
Ni	10.1	7.8	2.4 ± 0.0	23.5
	19.4	16.7	2.7 ± 0.2	13.9
	38.4	34.6	3.8 ± 0.0	9.9
	59.6	54.5	5.0 ± 1.1	8.5
	78.7	73.0	5.7 ± 0.1	7.3
	98.3	92.0	6.3 ± 1.4	6.5
	119.2	112.9	6.3 ± 2.2	5.3
	138.3	131.9	6.4 ± 2.2	4.6
Pb	29.6	13.2	16.3 ± 0.1	55.5
	49.6	28.6	21.0 ± 0.3	42.4
	69.6	44.8	24.7 ± 0.1	35.6
	88.4	61.9	26.5 ± 0.9	30.0
	119.0	86.2	32.7 ± 1.1	27.5
	147.9	115.2	32.7 ± 1.1	22.1
	169.9	134.1	35.6 ± 1.3	21.1
	198.9	162.4	36.5 ± 2.9	18.3

^a ค่าเฉลี่ย \pm SD (n = 3)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฐาปนพงศ์ พึ่งประสพ เกิดเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดสระแก้ว สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต โปรแกรมวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ในปี พ.ศ. 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย