

ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้ทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ
เหล็กออกไซด์

นายวรารุช วัดขนาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

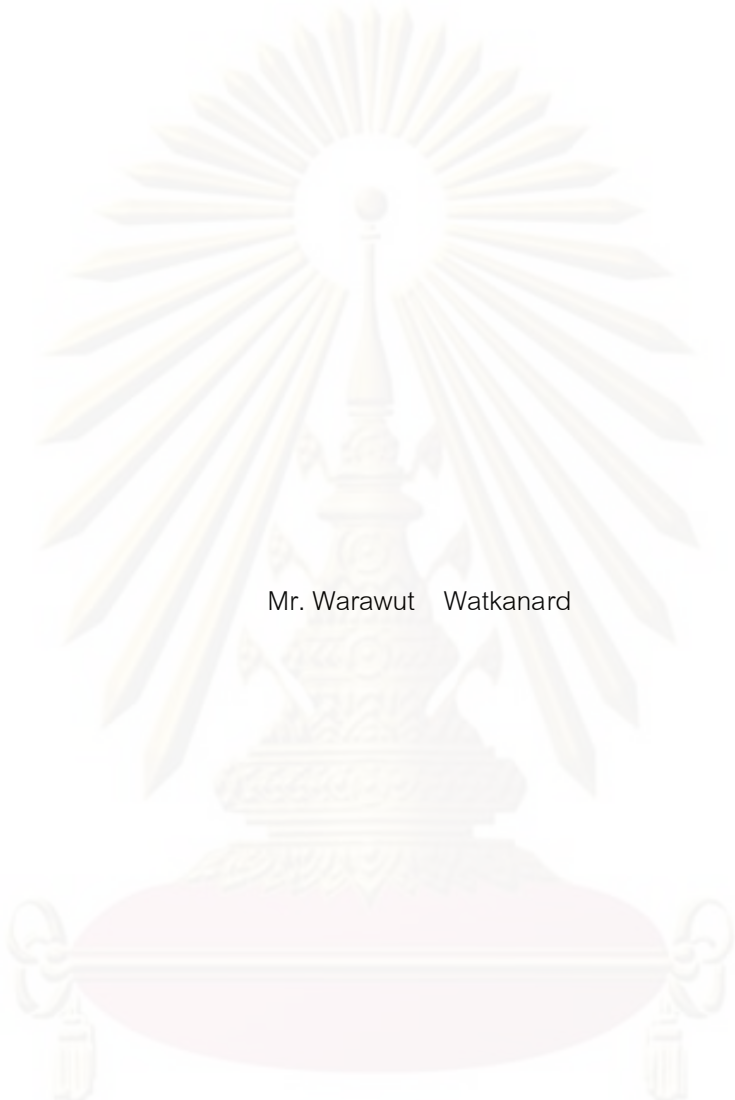
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CADMIUM IONS (II) REMOVAL EFFICIENCY USING IRON OXIDE-COATED ON USED
SAND OF FLUIDIZED BED REACTOR



Mr. Warawut Watkanard

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน(II)โดยใช้ทรายที่ใช้
แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์

โดย

นาย วราวุธ วัฒนาค


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

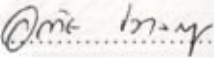
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

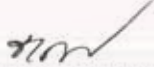
รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiruwongศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุทธวงษ์)

วราวุธ วัฒนาค:ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน(II)โดยทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์. (CADMIUM IONS (II) REMOVAL EFFICIENCY USING IRON OXIDE-COATED ON USED SAND OF FLUIDIZED BED REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์, 174 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดและทรายธรรมชาติมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ในการทดลองไม่ต่อเนื่อง ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดแคดเมียมคือ พีเอช ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่เหมาะสม ความเข้มข้นที่เหมาะสม การคายซับด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น และไอโซเทอม การดูดติดผิว การทดลองต่อเนื่องด้วยคอลัมน์ดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ

ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดคือ เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมงค่าพีเอชที่เป็นกลาง ความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ มีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ร้อยละ 88.66 และ 89.09 ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบแลงมัวร์ ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์เท่ากับ 0.26 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการศึกษาการคายซับ พบว่าทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ เท่ากับร้อยละ 46.57 และ 43.87

ในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงของตัวดูดซับ 30,60 และ 90 เซนติเมตรป้อนน้ำเสียแบบไหลลงที่ 25 มิลลิตรต่ออนาที พบว่าปริมาณน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวดูดซับที่จุดหมดสภาพของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 244.6, 297.2, 345.8 และ 248.8, 292.3, 340.3 เท่าของปริมาตรของคอลัมน์ ตามลำดับ ผลของการฟื้นฟูสภาพใน 5 รอบการทำงานพบว่า คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจะลดลงเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพ

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา...2552

ลายมือชื่อนิสิต..... วรวิธ วัฒนาค

ลายมือชื่อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

#5070606221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : USED SAND /IRON OXIDE /COATED/ CADMIUM IONS (II) /
FLUIDIZED BED

WARAWUT WATKANARD : CADMIUM IONS (II) REMOVAL EFFICIENCY
USING IRON OXIDE-COATED ON USED SAND OF FLUIDIZED BED
REACTOR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT,
Ph.D.,174 pp.

The purpose of this research was to study the removal cadmium of wastewater using iron oxide-coated on used sand of fluidized bed reactor (FCS) and iron oxide-coated on natural sand (NCS).In the batch experiment, The influence of pH, contact time for equilibrium on removal capability were considered, Desorption of cadmium from goethite by acid solution and distilled water, the influence of concentration and adsorption Isotherm. Finally, the continuous adsorptive column was studied using down flow column and regenerating ion by acid solution

Study the efficiency of adsorbent show that the suitable adsorption condition of adsorbents are 4 hours had not been adjudge of pH, Cadmium Ions (II) concentration in synthetic wastewater was 3.00 mg/l The results of FCS and NCS, the removal efficiency 88.66% and 89.09% respectively and isotherm by Langmiur equation, the maximum adsorption capacity at 0.26 mg /g . The study of desorption with acid show that cadmium ion is to leach of FCS and NCS at 46.57% and 43.87%

In continuous experiment in column at concentration of cadmium at 3 mg/l at depth of adsorbent 30,60 and 90 cm down flow 25 ml/min. The results indicated that the breakthrough volumes of FCS and NCS each depth were 244.6, 297.2, 345.8 and 248.8,292.3, 340.3 bed volume respectively. The result of regeneration 5 cycle found that quantity of treated water was average decreasing

Department : Environmental Engineering

Student's Signature *Warawut Watkanard*

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature *T. Srisatit*

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือที่ดีจากหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

คุณความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดามารดา ผู้ที่มีพระคุณอย่างสูงยิ่ง ซึ่งให้การอบรม การเลี้ยงดู การศึกษา มาตั้งแต่เยาว์วัย และยังได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีที่สุด ในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้วยดีเสมอไป และได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตลอดจนความห่วงใย และกำลังใจที่ได้รับโดยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุททวงศ์ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำชี้แนะ และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานด้านต่างๆตลอดช่วงระยะเวลาที่ได้เข้ารับการศึกษ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกครั้งเมื่อมีปัญหา และกำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แคดเมียม.....	4
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	4
2.1.2 แคดเมียมในน้ำ.....	6
2.1.3 การนำมาใช้ประโยชน์.....	9
2.1.4 การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม.....	9
2.1.5 ความเป็นพิษ.....	10
2.1.6 แหล่งแคดเมียมจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ.....	13
2.2 ทราย.....	14
2.2.1 การกำเนิดทราย.....	14
2.2.2 ชนิดของทราย.....	16
2.2.3 ประโยชน์ของทราย.....	16
2.2.4 คุณสมบัติของทรายที่ใช้กรองน้ำ.....	16

	หน้า
2.3 เหล็ก.....	17
2.3.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม.....	17
2.3.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก.....	18
2.3.3 เหล็กออกไซด์.....	20
2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์.....	21
2.4 ฟลูอิดไดเซชัน.....	23
2.4.1 นิยาม.....	23
2.4.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	24
2.4.3 ลักษณะการทำงานของฟลูอิดไดซ์เบด.....	24
2.4.4 ปริมาณการใช้วัสดุดิบ.....	27
2.4.5 ผลวิเคราะห์ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	28
2.4.6 กากของเสียอุตสาหกรรม.....	30
2.5 เทคโนโลยีการกำจัดแคดเมียมในน้ำ.....	32
2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี.....	32
2.5.2 การแลกเปลี่ยนประจุ.....	33
2.5.3 กระบวนการเมมเบรน.....	34
2.5.4 การใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับแคดเมียม.....	35
2.5.5 การใช้โลหะออกไซด์.....	35
2.5.6 มาตรฐานการควบคุมแคดเมียม.....	36
2.6 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ.....	37
2.6.1 กลไกการดูดติดผิว.....	38
2.6.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	40
2.6.3 สมดุลการดูดติดผิว.....	41
2.6.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	41
2.6.5 การทดลองด้วยคอลัมน์ดูดซับ.....	44
2.6.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	47

2.7 การดูตติตติผิวด้วยไฮดรึสโลหะออกไซด์.....	51
2.7.1 ลักษณะของไฮดรึสโลหะออกไซด์.....	51
2.7.2 การดูตติตติผิวไอออนบวกด้วยไฮดรึสโลหะออกไซด์.....	53
2.7.3 การดูตติตติผิวไอออนลบด้วยไฮดรึสโลหะออกไซด์.....	54
2.8 การบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	55
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	55
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูตติตติผิวแคดเมียม.....	57
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	59
3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย.....	59
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	60
3.3 การเตรียมตัวกลางดูตติตติ.....	61
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
3.5 การดำเนินการวิจัย.....	63
3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	63
3.5.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูตติตติผิวของแคดเมียม.....	64
3.5.3 การศึกษาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูตติตติ.....	66
3.5.4 การศึกษาการคายซับไอออนแคดเมียมด้วยสารละลายกรด.....	71
3.5.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูตติตติ โดยคอลัมน์ดูตติตติ.....	72
3.5.6 การศึกษาผลการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	73
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลทดลอง.....	77
4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุดูตติตติ.....	77
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ.....	77
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี.....	84

4.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	90
4.2.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม.....	90
4.2.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม.....	92
4.2.3 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม.....	95
4.3 การวิเคราะห์หาไอโซเทอมที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	97
4.3.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	97
4.3.2 ผลการศึกษาการคายซับของตัวดูดซับ.....	101
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวโดยทดลองแบบคอลัมน์.....	103
4.4.1 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด ที่ความสูงของทรายต่างกัน.....	105
4.4.2 การศึกษา คำนวนค่า q_0 และ k_1 จากสมการของ Thomas.....	110
4.4.3 การฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่.....	113
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	117
รายการอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	125
ภาคผนวก ก. วิธีทดสอบและผลการทดสอบ การชะละลาย และการย่อย.....	126
ภาคผนวก ข. ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	132
ภาคผนวก ค. บันทึกข้อมูลผลการทดลองระยะเวลาเข้าสู่สมดุล.....	136
ภาคผนวก ง. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง พีเอช ความเข้มข้น.....	143
ภาคผนวก จ. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง ไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	147
ภาคผนวก ฉ. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง คอลัมน์ดูดซับ.....	151
ภาคผนวก ช. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง การฟื้นฟูสภาพ.....	164
ภาคผนวก ซ. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง การคำนวณตามสมการ Thomas	170
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	174

สารบัญตาราง

<u>ตารางที่</u>		<u>หน้า</u>
2.1	คุณสมบัติทั่วไปของแคดเมียม.....	5
2.2	สารประกอบแคดเมียมต่างๆที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรม.....	10
2.3	ค่าประมาณปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่บรรยากาศและมหาสมุทร.....	12
2.4	ลักษณะสมบัติของทรายกรองน้ำในเชิงพาณิชย์.....	17
2.5	ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบเหล็ก.....	20
2.6	ปริมาณการใช้ทรายและราคา.....	27
2.7	ผลการวิเคราะห์ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	28
2.8	มาตรฐานค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในสิ่งแวดล้อม.....	36
2.9	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	39
2.10	แสดงค่า ZPC ของสารดูดติดผิว (Adsorbent) สำหรับโลหะหนักในน้ำ ธรรมชาติ.....	52
3.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีกับวิธีวิเคราะห์.....	64
4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ.....	80
4.2	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับ ที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF).....	85
4.3	ปริมาณเหล็กที่สะสมบนตัวดูดซับ.....	89
4.4	ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich Adsorption Isotherm ของตัวดูดซับ...	99
4.5	ผลการคายซับของตัวดูดซับ.....	102
4.6	ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมในคอลัมน์.....	109

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

<u>รูปที่</u>		<u>หน้า</u>
2.1	แสดงขอบเขตสถานะของแคดเมียมในน้ำที่มีซัลเฟอร์และคาร์บอนเนต.....	8
2.2	pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก.....	19
2.3	การเกิดปฏิกิริยาแบบ inner-sphere และ outer- sphere complexation	22
2.4	การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์.....	22
2.5	การดูดซับแคทไอออนบริเวณผิวของไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (III) ออกไซด์.....	23
2.6	ส่วนประกอบภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	25
2.7	ระบบการทำงานของเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	26
2.8	การกำหนดรหัสของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	31
2.9	การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	33
2.10	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	41
2.11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน.....	42
2.12	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิช.....	43
2.13	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์.....	44
2.14	การเคลื่อนตัวของ Adsorption zone สำหรับชั้นตัวดูดซับ.....	46
2.15	สารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมในสารละลายที่พีเอชต่างๆ.....	49
2.16	ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของแคดเมียมไอออนบนถ่านกัมมันต์.....	50
2.17	การแลกเปลี่ยนแอนไอออนกับผิวของเหล็ก.....	54
3.1	ขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	62
3.2	ศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	67
3.3	ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	68
3.4	ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	69
3.5	แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์โดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดซับ.....	70

<u>รูปที่</u>		<u>หน้า</u>
3.6	แผนภาพการทำงานของคอลัมน์ดูดซับ.....	74
3.7	ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ที่ความสูงต่างๆ.....	75
3.8	ศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อการนำกลับมาใช้ งานใหม่.....	76
4.1	วัสดุดูดซับ ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	78
4.2	วัสดุดูดซับ ทรายธรรมชาติ.....	78
4.3	การเคลือบด้วยสารละลายเหล็กออกไซด์.....	78
4.4	หลังจากอบทรายที่เคลือบด้วยสารละลายเหล็กออกไซด์.....	79
4.5	ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์.....	79
4.6	ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์.....	79
4.7	พื้นผิวของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนเคลือบกำลังขยาย 1,000 เท่า	82
4.8	พื้นผิวของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์กำลังขยาย 1,000 เท่า	82
4.9	ลักษณะพื้นผิวของทรายธรรมชาติก่อนเคลือบกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	83
4.10	ลักษณะพื้นผิวของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์กำลังขยาย 1,000 เท่า...	83
4.11	ค่า A (Absorbance) และช่วงความถี่ (cm-1) ของตัวดูดซับก่อนเคลือบด้วยเหล็ก ออกไซด์.....	87
4.12	ค่า A (Absorbance) และช่วงความถี่ (cm-1) ของตัวดูดซับหลังเคลือบด้วยเหล็ก ออกไซด์.....	88
4.13	แสดงสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กที่สะสมบนตัวดูดซับ.....	90
4.14	ร้อยละในการกำจัดแคดเมียมที่เวลาเข้าสู่สมดุลต่างๆ.....	92
4.15	ร้อยละในการกำจัดแคดเมียมที่พีเอชต่างๆ.....	94
4.16	ผลการตกตะกอนของแคดเมียมไอออน(II) ที่เกิดขึ้นที่พีเอชต่างๆ.....	95
4.17	ผลของร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	96
4.18	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	97
4.19	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช.....	99
4.20	รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับ.....	99

<u>รูปที่</u>	<u>หน้า</u>
4.21	คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง..... 104
4.22	ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้า โดยใช้ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ..... 106
4.23	ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้า โดยใช้ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์..... 107
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90เซนติเมตร.... 107
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 60เซนติเมตร.... 108
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 30เซนติเมตร.... 108
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเดินระบบกับค่าพีเอชของสารละลายแคดเมียมไอออน(II) ที่ออกจากระบบที่ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 ซม..... 109
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเดินระบบกับค่าพีเอชของสารละลายแคดเมียมไอออน(II) ที่ออกจากระบบที่ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 ซม..... 109
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับ $\ln(C_0/C-1)$ ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร..... 111
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับ $\ln(C_0/C-1)$ ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร..... 111

<u>รูปที่</u>	<u>หน้า</u>
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมออก ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของ ตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตรหลังทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1.....	114
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมออก ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของ ตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตรหลังทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2.....	115
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมออก ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของ ตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตรหลังทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3.....	115
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมออก ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของ ตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตรหลังทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 4.....	116
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมออก ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของ ตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตรหลังทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาผลกระทบการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ยังคงเป็นปัญหาที่ได้รับ ความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากโลหะหนักเป็นสารที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อยมาก เมื่อเกิด การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการตกค้างและสะสมในสิ่งมีชีวิตและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ทาง ห่วงโซ่อาหาร ส่งผลให้เกิดโรคและความผิดปกติขึ้นได้ (Bailey และคณะ, 1999)

แคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ต่างๆ เช่น การถลุงแร่ การเคลือบผิวหรือชุบโลหะ อุตสาหกรรมสี แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย ยางรถยนต์ และจักรยานยนต์ ผลิตปุ๋ยฟอสเฟต อุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้น น้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จึงมีโอกาพบแคดเมียมจากกระบวนการผลิตปนเปื้อนอยู่ ซึ่งถ้าหาก โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการจัดการ การบำบัด รวมถึงการป้องกันการรั่วไหลหรือแพร่กระจายของ แคดเมียมอย่างไม่ถูกวิธีจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อมนุษย์

วิธีการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ การ ตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการ กรองผ่านเมมเบรน (Membrane Process) และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon Adsorption) เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ แต่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุน สูง รวมทั้งต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ (Brown และคณะ, 2000)

การบำบัดแคดเมียมโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (Iron - Oxide Coated Sand) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งไม่ต้องใช้หน่วยบำบัดหลายขั้นตอนและเทคโนโลยีที่สูงมากนัก อีกทั้งจาก การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถบำบัดโลหะหนักได้หลายชนิด ซึ่งหากสามารถนำของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีอยู่ปริมาณมากมาใช้ให้เกิดประโยชน์ นับว่าเป็นวิธีการ หนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมและค่าใช้จ่ายที่ต้องนำไปกำจัด

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ทรายจากเตาฟลูอิดไอดีซ์เบด ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณ 27 ตันต่อเดือนซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องนำไปกำจัด 35,100 บาทต่อเดือน โดยนำไปใช้เคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำไปกำจัดแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) โดยเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยทำการศึกษาคูณสมบัติของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ทั้งลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในการเป็นดูดซับแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) อีกทั้งยังศึกษาประสิทธิภาพ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) ในสารละลาย เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีแคดเมียมปนเปื้อนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางทรายธรรมชาติกับทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไอดีซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) ในสารละลายโดยใช้ ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิด
3. เพื่อศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิดเพื่อนำ กลับมาใช้ งานใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทรายจากเตาฟลูอิดไอดีซ์เบดได้มาจากบริษัทไทยโทเรเทคไทยมีลส์ จำกัด อ.นครชัยศรี จ. นครปฐมและทรายธรรมชาติจากทรายแม่น้ำ
2. เตรียมตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์โดยใช้ $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ (modified Adsorption Method) ตามวิธีการของ Benjamin และคณะ (1996)
3. ลักษณะทางกายภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งนี้ได้ศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งก่อนและหลังเคลือบ
4. องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณออกไซด์ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ และวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังเคลือบ
5. คอลัมน์ดูดซับ (Adsorption Column) สูง 120 เซนติเมตรเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.8 เซนติเมตร

6. น้ำเสียสังเคราะห์จาก สารประกอบแคดเมียมไนเตรท $Cd (NO_3)_2$ ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย แคดเมียมไอออน (II) ที่ความเข้มข้น 3 7 และ 10 มก./ล.
7. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ณ อุณหภูมิห้องคงที่ ได้แก่ สภาวะความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล ความเข้มข้น และไอโซเทอมการดูดซับ
8. ระดับความสูงของชั้นเหล็กออกไซด์ที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับที่ศึกษานี้แบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 30 60 และ 90 เซนติเมตร เลือกอัตราการกรองที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 25 มล./นาที
9. พื้นฟูประสิทธิภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยใช้สารละลาย กรดอะซิติก CH_3COOH ที่อัตราการกรอง 25 มล./นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำทรายเก่าที่ผ่านการใช้งานในเตาฟลูอิดไดส์ เบดนำกลับมาใช้ใหม่
2. สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือฝังกลบทรายจากเตาฟลูอิดไดส์เบด
3. เพื่อพัฒนาตัวดูดซับให้สามารถเป็นแนวทางเลือกหนึ่ง ในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เพื่อนำไปบำบัดต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียม

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 5 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่นบางๆได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ เป็นสารเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นโลหะหนักเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยการปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลิตผลทางการเกษตร จะเกิดการสะสมและถ่ายทอดสู่มนุษย์ได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร เมื่อสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อจนถึงระดับหนึ่งจะก่อให้เกิดโรคหรือความพิการจนอาจถึงตายได้ (เกษตรฯ,2537)

โลหะหนักที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ได้แก่ แคดเมียม ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี การนำไปใช้ประโยชน์ การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม และความเป็นพิษ ดังนี้

2.1.1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันหมู่ II B จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับสังกะสี ในตารางธาตุ ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของแคดเมียมดังตารางที่ 2.1

แคดเมียม เป็นโลหะหนัก มีสีขาว ฟ้ำ วาว มีลักษณะเนื้ออ่อน สามารถบิดโค้ง งอได้ และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็กๆในอากาศที่มีความชื้น แคดเมียมจะถูกออกซิไดส์เป็นแคดเมียมออกไซด์ ในธรรมชาติแคดเมียมมักจะอยู่รวมกับกำมะถัน ใน

รูปแคดเมียมซัลไฟด์ และมักปนอยู่ในสินแร่สังกะสี ตะกั่ว หรือทองแดง ดังนั้น ในการทำเหมืองแร่สังกะสีจะได้แคดเมียมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) มีการนำโลหะแคดเมียมมาใช้ในวัสดุแผ่นผสมของอัลลอยด์ใช้ในการทำนิกเกิลแคดเมียม แบตเตอรี่ เป็นเป็นสารคงตัวในโพลีไวนิลคลอไรด์ใช้ทำสี พลาสติกและแก้ว เป็นส่วนผสมของอมัลกัม(Amalgam) ที่ใช้ในร้านทันตแพทย์ผลิตภัณฑ์ที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบถ้าให้ความร้อนเกินจุดหลอมเหลว (321 องศาเซลเซียส) จะเกิดควันของแคดเมียม (Cadmium Flumes) การนำเอาแคดเมียมมาใช้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม ทั้งในอากาศ น้ำ และดิน รวมทั้งในอาหาร เมื่อมีมากๆจะเกิดสะสมโดยเฉพาะมนุษย์และสัตว์ ถ้ามีการสะสมของแคดเมียมในร่างกายมากอาจก่อให้เกิดพิษได้ (สุวัจน์,2549) คุณสมบัติของแคดเมียมดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของแคดเมียม

คุณสมบัติ	คุณสมบัติ
สัญลักษณ์	Cd
เลขอะตอม	48
โครงสร้างผลึก	Close-Packed Hexagonal
น้ำหนักอะตอม	112.41
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม. ที่ 20 °ซ)	8.65
จุดหลอมเหลว (°ซ)	320.9
จุดเดือด (°ซ)	765
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (แคลอรี/กรัม)	13.2

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (แคลอรี/กรัม)	286.4
สถานะออกซิเดชัน	+2
สี	ขาว เงิน

ที่มา : (Townshend ,1995 อ้างถึงใน นคร,2549)

แคดเมียมสามารถพบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ อยู่ร่วมกับธาตุสังกะสี (Zinc) ตะกั่ว (Lead) และคอปเปอร์ซัลไฟด์ (Copper Sulfide) ในชั้นเปลือกโลกมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 0.2 ppm ในหินอัคนี (Igneous Rocks) พบแคดเมียมอยู่ในระดับต่ำ (<0.001-1.6 ppm) แต่ในหินตะกอน (Sedimentary Rocks) พบแคดเมียมอยู่ในระดับสูง เนื่องจากหินตะกอนมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ก้อนแร่ แมงกานีส (Manganese Nodule) และแร่ฟอสฟอไรต์ (Phosphorite) แคดเมียมจะพบมากในวัสดุที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสูง เช่น ในถ่านหิน พบแคดเมียม 0.01-22 ppm และในน้ำมันดิน พบแคดเมียม 0.01-16 ppm (Fergusson,1990)

2.1.2 แคดเมียมในน้ำ

พฤติกรรมของธาตุแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมจะมีลักษณะคล้ายกับธาตุสังกะสี แคดเมียมสามารถรวมตัวกับไอออนชนิดอื่นอยู่แล้วในรูปสารประกอบ ซึ่งมีอยู่ 4 ชนิดหลัก คือแคดเมียม เฮไลด์ (Cadmium Halide) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium Oxide) และสารประกอบออร์แกนิกแคดเมียม (Organocadmium Compound) รูปแบบแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับพีเอช (pH) รูปแบบของแคดเมียมยังสามารถพบในรูปของสารประกอบอื่นๆ ได้แก่ $CdO, CdS, Cd(OH)_2, CdCO_3,$ และ $CdSiO_3$ แต่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อย (สุวัจน์,2549)

2.1) แคดเมียม เฮไลด์ (Cadmium Halide) มีอยู่ 4 ชนิด แต่ในรูปแคดเมียมคลอไรด์ (Cadmium Chloride : $CdCl_2$) เป็นรูปแบบที่สำคัญในสิ่งแวดล้อม รูปแบบที่พบมาก คือ $CdCl^+$, $CdCl_2$ และ $CdCl^-$ และประมาณร้อยละ 2.5 เปอร์เซนต์ ของแคดเมียมทั้งหมดจะพบในรูปของ

แคดเมียมไอออนอิสระ (Free Cadmium Ion : Cd^{+2}) (Fergusson, 1990) อย่างไรก็ตาม รูปแบบของแคดเมียมไฮไลด์ จะสามารถละลายในน้ำและเกิด Complex Ions

2.2) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) สารประกอบแคดเมียมในรูปนี้เกิดขึ้นโดยการผ่านไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)ลงในสารละลายแคดเมียม ($Cd(II)$) ไอออนของ Cd^{2+} และ S^{2-} สามารถรวมตัวได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ เนื่องจากไอออนแบบมีขั้ว สารประกอบที่เกิดขึ้นสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก แคดเมียมซัลไฟด์มักเป็นรูปแบบที่ค่อนข้างคงที่ และมักพบในสภาพแวดล้อมแบบรีดักชัน

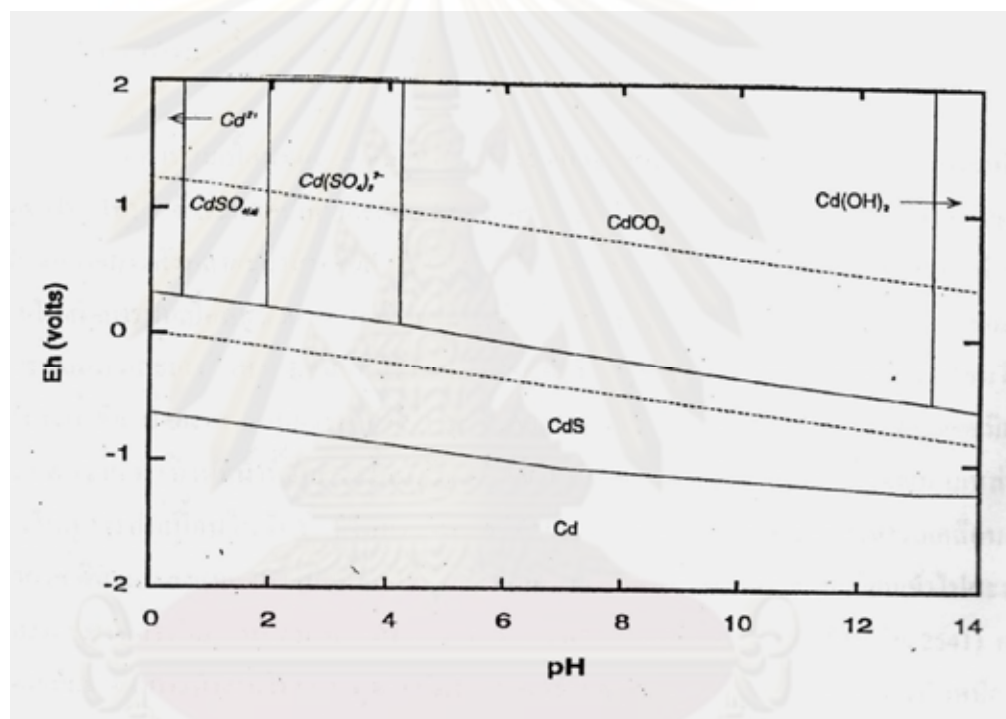
2.3) แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium Oxide) รูปแบบของแคดเมียมออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันธาตุแคดเมียมที่สัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน โดยสีของออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจมีสีที่แตกต่างกัน จากสีเขียว สีเหลือง และสีแดง บางครั้งอาจมีสีดำ โครงสร้างของแคดเมียมออกไซด์มีลักษณะคล้ายกับโซเดียมคลอไรด์ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปได้เมื่ออุณหภูมิร้อน เนื่องจากการสูญเสียออกซิเจน แคดเมียมออกไซด์ละลายในกรด แต่ละลายได้น้อยในน้ำและในสภาพเป็นด่าง (Fergusson, 1990)

2.4) สารประกอบออร์กาโนแคดเมียม (Organocadmium Compound) สารประกอบดังกล่าวสามารถได้จากการเตรียม Grignard Reagent ในสภาพที่เหมาะสม เช่น การต้ม Dimethylcadmium ที่ 105.7 องศาเซลเซียส และ Dimethylcadmium ที่ 64 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 19 มิลลิเมตรปรอท สารประกอบดังกล่าวสามารถสลายตัวได้ในแหล่งน้ำ

Faust และ Aly 1987 รายงานว่าแคดเมียมเมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในรูป Cd^{2+} $CdCO_3(s)$ และ $Cd(OH)_2(s)$ ดังสมการที่ (1) และ (2)



โดยค่า pH สูงกว่า 10 ซึ่ง CdCO_3 สามารถละลายน้ำได้ประมาณ 300 ไมโครกรัมต่อลิตรและที่ pH เท่ากับ 10 Cd(OH)_2 ละลายน้ำได้ประมาณ 225 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่หากมีการละลายของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลงสู่น้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้แคดเมียมไฮดรอกไซด์และแคดเมียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนอยู่เปลี่ยนรูปและสามารถละลายกลับขึ้นมาสู่น้ำได้อีก สำหรับแหล่งน้ำที่มีซัลเฟอร์อยู่เมื่อเกิด Reducing Condition แคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขอบเขตสถานะของแคดเมียมในน้ำที่มีซัลเฟอร์และคาร์บอเนต(Sulfur Carbonate Water System) $\text{Cd} = 0.001 \text{ M}$; $\text{S} = 0.1$; $\text{C} = 0.1 \text{ M}$ ที่มา : Faust และ Aly (1987)

แคดเมียมในรูป Hydrated Cd^{2+} มักพบในสภาพออกซิเดชัน โดยเฉพาะสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปในแหล่งน้ำจืด และน้ำที่มีระดับความเค็มต่ำ แต่ในสภาพรีดักชันและมีซัลเฟอร์ปรากฏรวมอยู่ด้วย แคดเมียมอาจอยู่ในรูป CdHS^- (Fergusson, 1990)

รูปแบบของแคดเมียมบริเวณผิวน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากแคดเมียมอยู่ในรูปของ Cd^{2+} (2+ Oxidation State) ปฏิกริยาออกซิเดชันและรีดักชันจะมีอิทธิพลค่อนข้างน้อยต่อรูปแบบของแคดเมียมที่ละลายในน้ำ การดูดซับขึ้นอยู่กับอนุภาคของแร่ดินเหนียว (Clay) และเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) จะมีบทบาทสำคัญในปฏิกริยารีดักชันธาตุแคดเมียมในน้ำ อย่างไรก็ตาม แคดเมียมไม่สามารถถูกเปลี่ยนรูปได้โดยพวกจุลชีพหรือที่เรียกว่า Methylation เหมือนกับธาตุปรอท (US.EPA,1991 อ้างถึงใน นคร,2549)

2.1.3 การนำมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในหลายด้าน ได้แก่ อุตสาหกรรมและการเกษตร อุตสาหกรรมแคดเมียมและเกลือของแคดเมียมจำนวนมากมักถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาผสมกับโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ปรอท แมกนีเซียม นิกเกิล ทำเป็นโลหะผสม เช่น อัลลอยด์ ซึ่งนำไปทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่ออ เครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอมส่วนประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ยังทำเป็นแบตเตอรี่ นิกเกิล-แคดเมียม ผสมในยางเพื่อให้ความร้อนทำหน้าที่เป็น Stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีทาบ้าน สีชุบ โลหะ หมึกพิมพ์ กระดาษสีทอง เป็นต้น ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์สุริยะ (Solar Cell) และใช้ในงานทางด้านการแพทย์และทันตแพทย์ ด้านการเกษตรแคดเมียมถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา ส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต (สิทธิชัย,2541อ้างถึงใน นคร,2549) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบแคดเมียมอีกมากมายที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 2.2

2.1.4 การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมและมนุษย์

แคดเมียมสามารถเคลื่อนย้ายสู่อากาศ ดินและลงแหล่งน้ำ เมื่อคนและสัตว์บริโภคพืชหรือดื่มน้ำ จะได้รับแคดเมียมเข้าไปสะสมไว้และสามารถถ่ายทอด สะสม และเพิ่มขึ้นได้ในกระบวนการห่วงโซ่อาหาร (สิทธิชัย, 2541 อ้างถึงใน นคร,2549) คนรับแคดเมียม จากการทำงานโดยการสูดเอาไอระเหยของแคดเมียมซึ่งส่วนใหญ่มาจากการทำเหมืองและการหลอมโลหะ และการสูดควันบุหรี่ รวมไปถึง

ถึงการรับเข้าไปสู่ร่างกายโดยการกินอาหาร และดื่มน้ำที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ด้วย ตารางที่ 2.3 (พรรณราย,2545) เป็นการสรุปค่าประมาณปริมาณของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่บรรยากาศและมหาสมุทรที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์

2.1.5 ความเป็นพิษ

อันตรายที่เกิดจากแคดเมียมจากการบันทึกพบมีรายงานที่ประเทศญี่ปุ่น เมื่อครั้งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นการเกิดพิษแคดเมียมแบบเรื้อรังในชาวญี่ปุ่นซึ่งเรียกโรคนี้ว่า โรคอิไต-อิไต (Itai-Itai) ลักษณะอาการของโรคจะปวดกระดูกและส่วนข้อต่อต่างๆของร่างกาย เนื่องจากการได้รับแคดเมียมที่ปนเปื้อนจากโรงงานถลุงแร่สังกะสี ในปัจจุบันอาการที่แสดงอาการจากได้รับแคดเมียมมีลักษณะคล้ายกับการขาดสารอาหาร (Malnutrition) และขาดวิตามิน (Vitamin Deficiency) การได้รับแคดเมียมที่ละเล็กละน้อย เป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมแคดเมียมในไต

อาจจะทำให้เป็นโรคไตได้ จากการทดลองในสัตว์โดยการให้แคดเมียมทางน้ำและอาหาร พบว่าความดันเลือดสูงขึ้น เหล็กในเลือดต่ำ ประสาทและสมองเสียหาย เชื่อว่าแคดเมียมมีส่วนทำให้เป็นมะเร็งปอดแน่นอน แต่ในมนุษย์ยังไม่ทราบแน่นอนว่าถ้าสัมผัสแคดเมียมทางผิวหนังหรือรับแคดเมียมโดยทางน้ำและอาหารแล้ว แคดเมียมจะทำให้เป็นมะเร็งได้หรือไม่ (สุวัจน์,2549)

ตารางที่ 2.2 สารประกอบแคดเมียมต่างๆที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรม

สารประกอบ	การนำไปใช้ประโยชน์
แคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$)	-อิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์ -วัตถุตั้งต้นในการผลิตแคดเมียม -ยาฆ่าเชื้อราและยาฆ่าแบคทีเรีย -สารหล่อลื่น
แคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2$)	-กระเบื้องเคลือบและกระจก

	-ผงแพลทซ์สำหรับกล้องถ่ายภาพ -แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม
แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl_2)	-การถ่ายภาพ -การย้อมและการพิมพ์ -การทำดอกไม้เพลิง
แคดเมียมโบรไมด์ (CdBr_2)	-การถ่ายภาพ -กระบวนการแกะสลัก -การผลิต Epoxy Resin
แคดเมียมออกไซด์ (CdO)	-ตัวเร่งปฏิกิริยา -ตัวต้านทานในเตาเผาไฟฟ้า
แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)	-เครื่องตรวจจับการแผ่รังสี -การผลิตเม็ดสี -เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ -วัสดุไวแสง
แคดเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cd}(\text{OH})_2$)	-การผลิตตัวแคดเมียมอื่นๆ -แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม
แคดเมียมคาร์บอเนต (CdCO_3)	-การผลิตเกลือแคดเมียมอื่นๆ -ตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา : (Sriannathakumar,1988 อ้างถึงใน นคร,2549)

ตารางที่ 2.3 ค่าประมาณปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่บรรยากาศและมหาสมุทร

แหล่งกำเนิดของแคดเมียม		ค่าประมาณในแต่ละปี (10 ³ ตัน)
แคดเมียมที่ปล่อยสู่บรรยากาศ แหล่งธรรมชาติ	ภูเขาไฟ	0.82
	อนุภาคดินเหนียว	0.21
	ไฟป่า	0.11
	ละอองเกลือทะเล	0.06
	ชีววิทยาของสิ่งมีชีวิต	0.24
ผลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ		1.44
การกระทำของมนุษย์	การถลุงแร่	5.59
	การเผาขยะ	0.75
	การเผาไหม้ถ่านหิน	0.53
	การผลิตซีเมนต์	0.27
	ปุ๋ยฟอสเฟต	0.17
	การเผาไหม้น้ำมัน	0.14
	การเผาไหม้	0.12
ผลรวมจากการกระทำของมนุษย์		7.57

แคดเมียมที่ปล่อยลงสู่ มหาสมุทร แหล่งน้ำธรรมชาติ	การไหลของแม่น้ำ	5.11
	การฝังตัวของชั้นบรรยากาศ	0.72
ผลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ		5.83
การกระทำของมนุษย์	น้ำเสียจากบ้านเรือน	1.74
	การผลิตพลังงานไฟฟ้า	0.13
	เหมืองแร่ การถลุงแร่ การกลั่นน้ำมัน	1.95
	ขบวนการผลิตต่างๆ	2.45
	ขยะ	0.69
	การฝังตัวจากชั้นบรรยากาศ	2.27
ผลรวมที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์		9.23

ที่มา: พรรณราย (2545)

2.1.6 แหล่งแคดเมียมจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

สุวัจน์ (2549) ได้รายงานว่ามีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 100-500 ppm การสีกร่อนของยางรถยนต์และจักรยานยนต์ ซึ่งแคดเมียมเป็นองค์ประกอบประมาณ 20-90 ppm ส่วนการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตโดยหินฟอสเฟตที่ใช้เป็นวัตถุดิบจะมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 30 ppm

2.2 ทราย (Sand) (กรมทรัพยากรธรณี,2543 อ้างถึงใน พงศภัทร,2549)

ทรายเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้ทั้งในงานก่อสร้างและอุตสาหกรรม มีลักษณะร่วนซุยเป็นเม็ดเล็ก ๆ ไม่เกาะกัน มีหลายสี เช่น สีขาว เทาอมชมพู ชมพูอ่อน และส้มอ่อน เป็นต้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดระหว่าง 0.06-2 มิลลิเมตร ลักษณะรูปร่างของทรายมีทั้งชนิดเหลี่ยมและชนิดมน มีความคงทน ทรายเป็นแร่ควอร์ตซ์ (quartz) หรือที่เรียกว่าแร่เขี้ยวหนุมานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) และส่วนประกอบอื่น ได้แก่ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , H_2O และ LOI (Loss of Ignition คือ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการพิจารณาคุณภาพของทรายเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม ทรายมีขนาดต่างกัน ซึ่งแบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายได้ดังนี้

ทรายละเอียด	มีขนาดตั้งแต่	0.125-0.25 มิลลิเมตร
ทรายขนาดกลาง	มีขนาดตั้งแต่	0.25-0.5 มิลลิเมตร
ทรายหยาบ	มีขนาดตั้งแต่	0.5-1 มิลลิเมตร
ทรายหยาบมาก	มีขนาดตั้งแต่	1-2 มิลลิเมตร

ถ้าวัสดุนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 2 มิลลิเมตร และอยู่ระหว่าง 2-64 มิลลิเมตร จัดเป็นกรวด (Gravel) กรวดจะเกิดร่วมกับทราย แต่กรวดนอกจากจะเป็นแร่ควอร์ตซ์ยังเป็นหินและมีแร่ชนิดอื่นด้วย

2.2.1. การกำเนิดทราย

ทรายเป็นตะกอนที่เกิดจากการสลายตัวผุพังของหินหลายชนิด เช่น หินชั้น หินอัคนีและหินแปร แต่หินที่ผุพังแล้วให้ตะกอนทรายได้ดีคือ หินทราย และหินแกรนิต เนื่องจากหินแกรนิตมีแร่ควอร์ตซ์เป็นแร่ประกอบหินอยู่มากและมีเม็ดโตเมื่อเกิดการผุพังจึงให้ปริมาณทรายมาก และแร่ควอร์ตซ์เป็นแร่ที่คงทนต่อการกัดกร่อน ทรายที่เกิดจากหินแกรนิตจึงมีขนาดเม็ดค่อนข้างใหญ่กว่าทรายที่เกิดการผุพังของหินทราย นอกจากนี้แร่ควอร์ตซ์ที่ประกอบเป็นหินทรายจะมีขนาดเล็กและ

อัดตัวกันไม่แน่นจึงยุ่งง่ายเมื่อถูกพัดพามา ดังนั้นขนาดของทรายจึงแปรผันไปตามลักษณะหินต้นกำเนิด และระยะทางที่ถูกพัดพามาตะกอนทรายที่สะสมตัวของประเทศไทยส่วนมากเกิดขึ้นในยุคควอเทอร์นารี(Quaternary) ซึ่งเป็นยุคสุดท้ายของการแบ่งเวลาทางธรณีวิทยา โดยมีอายุประมาณ 2 ล้านปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน

2.2.2 ชนิดของทราย

การแบ่งชนิดทรายและการเรียกชื่อขึ้นอยู่กับสถานที่กำเนิดของแหล่งทรายนั้นๆโดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด

1) **ทรายบก** ทรายบก หมายถึง ทรายที่มีต้นกำเนิดอยู่บนแผ่นดิน ส่วนมากจะถูกพัดพามาสะสมตัวในรูปแบบต่าง ๆ กัน ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ทรายบกเป็นทรายที่พบในดินและมีหน้าดินปิดทับอยู่ ทรายชนิดนี้จะอยู่ลึกลงไปดินมากกว่า 30-100 เมตร ลักษณะของทรายชนิดนี้จะป็นชั้น ๆ มีทรายละเอียดและหยาบสลับกันไป องค์ประกอบของเม็ดทรายประกอบด้วยแร่ควออร์ทซ์ เฟลด์สปาร์ไมกาและเหล็กออกไซด์ ทรายชนิดนี้จะมีเนื้อดินปะปนอยู่ทำให้มีปริมาณซิลิกาต่ำโดยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบร้อยละ 88-90 เนื่องจากมีดินปะปนอยู่มาก ดังนั้นส่วนใหญ่จึงนำมาใช้ประโยชน์ในการถมที่ ส่วนทรายหยาบและทรายละเอียดจะนำมาใช้ในงานก่อสร้าง

2) **ทรายแม่น้ำ** ทรายแม่น้ำ หมายถึง ทรายที่ถูกพัดพามาสะสมตัวตามแม่น้ำ ลำคลอง ลำห้วยต่าง ๆ โดยรวมทั้งลำน้ำในอดีตและปัจจุบัน ลักษณะของทรายชนิดนี้จะมีสีเหลือง เนื่องจากมีเหล็กออกไซด์ปะปนอยู่และมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 87-89 ทรายชนิดนี้นิยมใช้ในงานก่อสร้าง เพราะมีลักษณะเป็นทรายหยาบและเม็ดทรายมีขนาดใหญ่

3) **ทรายชายทะเล** ทรายชายทะเลเป็นทรายที่เกิดจากการยุ่งของหินและถูกพัดพามาโดยกระแสน้ำทำให้เกิดการสะสมตัวตามชายทะเลหรือทะเลสาป เนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือของ NaCl , KCl และ MgCl_2 ผสมอยู่ทำให้ทรายชนิดนี้มีสารเคมีเหล่านี้ปะปนอยู่ ทรายชายทะเลมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 90-95 ทรายชนิดนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างเพราะสารเคมีข้างต้นที่ปะปนอยู่ทำให้ซีเมนต์ไม่จับตัวกัน

4) **ทรายแก้ว** ทรายแก้วพบอยู่ตามที่ราบชายทะเลห่างจากทะเลประมาณ 0.5-1 กิโลเมตรส่วนใหญ่พบในภาคตะวันออก เช่น จังหวัดระยอง จันทบุรี ตราด และภาคใต้ เช่น จังหวัด ชุมพรภูเก็ต ตรัง ปัตตานี นครศรีธรรมราช และสงขลา เป็นต้น โดยแต่ละแหล่งมีคุณภาพแตกต่างกัน ทรายชนิดนี้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมแก้วและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแก้วจึงเรียกว่า ทรายแก้ว หรือทรายซิลิกา เกิดจากแร่ 6 ชนิด คือ ควอร์ต คาลซิโดนี โอปอล ไทรติไมด์คริสโทบาไลต์ และเลอซาเทเลียไรต์ ซึ่งแร่เหล่านี้มีส่วนประกอบเป็น SiO_2 ทั้งสิ้น ทรายแก้วที่บดละเอียดแล้วจะเป็น ผงสีขาวและมีความวาวเหมือนแก้ว ทรายแก้วมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 95-99 ขึ้นไป

2.2.3 ประโยชน์ของทราย

การนำทรายมาใช้ประโยชน์นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของงานแล้วสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาเลือกชนิดของทรายซึ่งประโยชน์ของทรายมีมากมาย เช่น ใช้ในการก่อสร้าง ใช้สร้างถนน ใช้ทำไม้ขีดไฟใช้ในอุตสาหกรรมสี ใช้ในการกรองน้ำ ใช้ในอุตสาหกรรมทำสารเคมี ใช้ทำอิฐทนไฟใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา และใช้ในการทำแก้ว เป็นต้น

2.2.4 คุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการกรองน้ำ

คุณสมบัติเบื้องต้นของทรายที่ใช้ในการกรองน้ำต้องเป็นทรายบริสุทธิ์ ไม่มีดินเหนียวฝุ่น สารอินทรีย์ และแร่ไมกา เจือปนอยู่ ส่วนรูปร่างของเม็ดทรายไม่มีผลต่อการกรองน้ำมากนักแต่ไม่ควรมีรูปร่างแบนราบ ทรายที่มีเม็ดเหลี่ยมหรือกลมจะใช้ได้ดีและควรมีขนาดเท่า ๆ กันลักษณะสมบัติของทรายกรองน้ำในเชิงพาณิชย์ แสดงดังตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของทรายกรองน้ำในเชิงพาณิชย์

แหล่งทราย	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO
ระยอง	98.8.	0.2.	0.07.	0.4.	0.08.
จันทบุรี	99.2.	0.1.	0.15.	0.3.	0.05.
ตราด	99.2.	0.1.	0.01.	0.3.	0.05.
ชุมพร	98.8.	0.1.	0.01.	0.2.	0.04.
สงขลา	99.0.	0.3.	0.05.	0.3.	0.05.

ที่มา : บรรเจิด และคณะ (2544)

2.3 เหล็ก (Iron)

2.3.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม

เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่บนผิวโลกมาก พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งบนดินและในน้ำอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กและออกซิเจน หรือเรียกโดยรวมว่า เหล็กออกไซด์ (iron oxide) นอกจากนี้ยังมีไอรอนซัลไฟด์ หรือไพไรต์ (FeS₂) ซึ่งเป็นสินแร่ชนิดหนึ่งที่ไม่เสถียรเมื่ออากาศชื้นและถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย (เบญจวรรณ,2547)

เหล็กออกไซด์ มีอยู่ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนเกาะอยู่กับเหล็กว่ามากน้อยเพียงใด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe²⁺) มีสีเขียว เทา หรือน้ำเงิน และสารประกอบเฟอร์ริก (Fe³⁺) มีสีเหลืองแดงหรือน้ำตาล ในดินส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสินแร่ที่เรียกว่า ฮีมาไทต์ (hematite, Fe₂O₃) และเกอร์ไทต์ (goethite, FeOOH) ซึ่งมีสีเหลืองส้ม โดยเกอร์ไทต์เกิดมาจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไพไรต์ (pyrite) และซิเดอไรต์ (siderite) โดยอาศัยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดออกซิเดชัน Fe²⁺ เป็น Fe³⁺ ดังสมการที่ 11,12,13





Siderite

Hematite

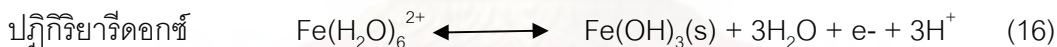
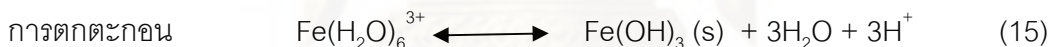
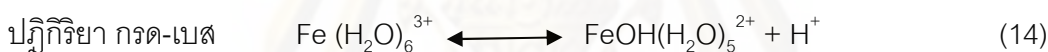


Hematite

Goethite

ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในธรรมชาติ โดยสารประกอบของเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดิน และส่งผลอย่างมากกับสีของดินที่ปรากฏ

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



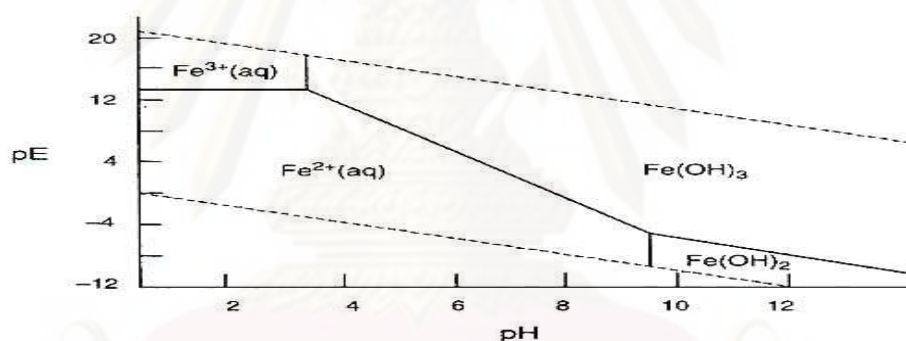
รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาได้กับแอนไอออนของสารอินทรีย์หรือกับสารอนินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (metal complex) หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (organometallic compound) ได้อีกด้วย

2.3.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก

ปฏิกิริยาเคมีที่มีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำเสีย คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เหล็กในรูปของเฟอริกไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ไอออนที่ละลายน้ำได้เหล็กจึงถูกปลดปล่อยและเกิดการปนเปื้อนดังสมการที่ 17



โดยในการอธิบายถึงระบบที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรหลายตัวเกิดขึ้นพร้อมกัน การสร้างไดอะแกรมแบบสองตัวแปร (two-variable diagram) เพื่อใช้ศึกษาจึงมีความแม่นยำกว่าพิจารณาจาก pE/pH ไดอะแกรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี้ (electron activity : a_e) และค่าไฮโดรเจนแอกติวิตี้ (hydrogen activity : pH) ที่สามารถบอกถึงสภาวะออกซิไดส์และสภาวะรีดิวซ์ (oxidizing and reducing : pE) ของระบบได้แต่เนื่องจากระดับของอิเล็กตรอนแอกติวิตี้ของน้ำแปรผันได้ในช่วงที่กว้างมาก จึงนิยมให้ pE เป็นตัวแทนในการแสดงค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี้สูง ระบบจึงอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ในขณะที่เมื่อค่า pE เป็นบวกนั้นคือในสารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี้ต่ำ ระบบจึงอยู่ในสภาวะออกซิไดส์ โดย pE ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง 25 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลง และรูปแบบหลัก (dominant species) ของไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก (Vanloon และ Duffy, 2000)

นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ยังแตกต่างกัน แม้ที่ระดับพีเอชเท่ากัน เกิดจากค่าคงที่ของสารละลาย (K_{sp}) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการละลายที่ต่างกัน โดยสารที่มีค่าคงที่ของการละลายมาก หมายถึงสามารถละลายได้มากและการตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ ดังตารางที่ 2.5 ที่แสดงค่าคงที่การละลายของสารประกอบเหล็กที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบของเหล็ก

(Ghosh,1965อ้างถึงใน เบญจวรรณ, 2547)

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

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

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

2.3.3 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide)

เหล็กออกไซด์เป็นไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (hydrous metal oxide) เนื่องจากเป็นของแข็งที่มีส่วนประกอบของไอออนบวกของโลหะรวมตัวอยู่กับธาตุน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่ง

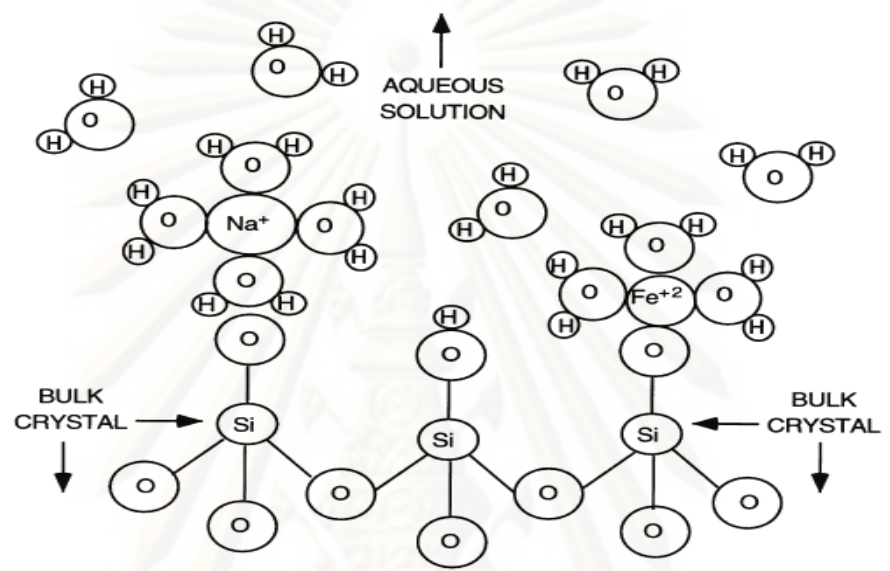
ครอบคลุมถึงสารประกอบของโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกไซด์ (OH) ออกซิไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) ที่มีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวที่ถูกไฮเดรตได้ง่าย สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดิน ดินเหนียว และตะกอนต่างๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุเหล่านั้น มีรูปแบบทางเคมี เช่น FeOH_3 (ferric hydroxide), FeO (ferrous oxide), Fe_2O_3 (ferric oxide หรือเรียกว่า hematite), Fe_3O_4 ซึ่งคือ $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ferrous ferric oxide หรือเรียกว่า magnetite) และ FeOOH เรียกว่า goethite โดย poorly crystalline หรือ amorphous hydrous ferric oxide ซึ่งอยู่ในรูปของ α , β หรือ γ จะเรียกว่า ferrihydrite เป็นต้น

เหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับสภาวะในการก่อตัว ตัวอย่างเช่น เกอร์ไทต์ (FeOOH) และ ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เกิดจากเหล็กที่อยู่ในรูปของออกซิไฮดรอกไซด์และออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งเกิดได้จากการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (sol-gel processing) ของสารละลายของเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างหรือ pH สูงแต่อุณหภูมิต่ำจะชักนำไปสู่การเกิดเกอร์ไทต์ ส่วนสภาวะที่ pH ต่ำ ($\text{pH} < 4$) และอุณหภูมิสูงๆ จะชักนำไปให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ อย่างไรก็ตามเมื่อปรับ pH ให้สูงขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำสารละลายเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะเกิดเป็น amorphous ferrihydrite (FeOOH) ซึ่งมีขนาดอนุภาค 3-5 nm หลังจากล้างและทำให้แห้งแล้วจะมีพื้นผิว 225-340 m^2/g ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง ประมาณ 4 nm แต่ถ้าให้ความร้อนที่ 400-700 $^{\circ}\text{C}$ ก็จะทำให้เกิดเป็นฮีมาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 nm โดยมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือน้อยกว่า 20 m^2/g และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงโดยเฉลี่ยเป็น 100 nm ส่วนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Fe_2O_3 หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน $\text{Fe}(\text{OH})_2$

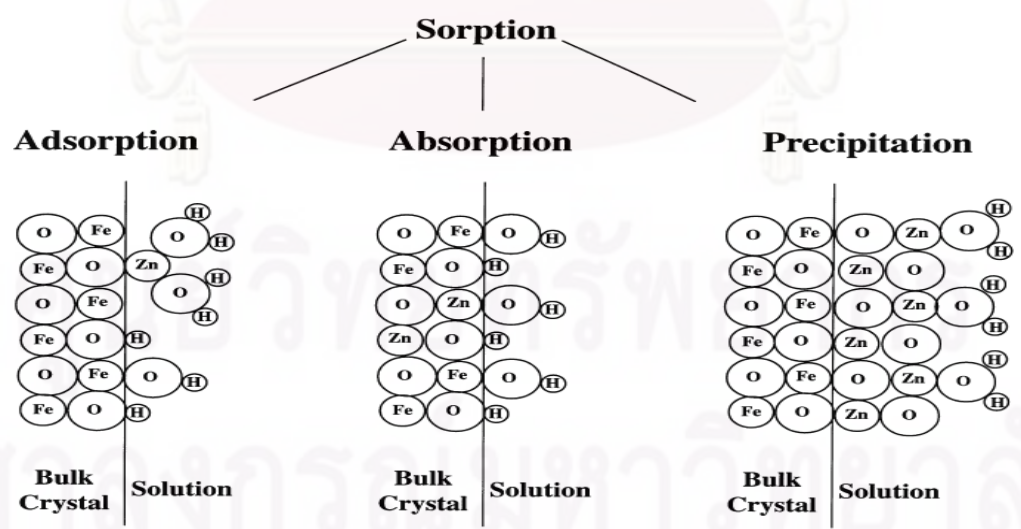
2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์

เมื่อออกไซด์ของเหล็กสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมที่เป็นได้ทั้งกรด-เบส (amphoteric) กล่าวคือ สามารถรับอิเล็กตรอนหรือปล่อยโปรตรอนก็ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะจึงมีได้หลายแบบ เรียกโดยรวมว่า sorption ซึ่งมีทั้งการดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (precipitation) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งการดูด

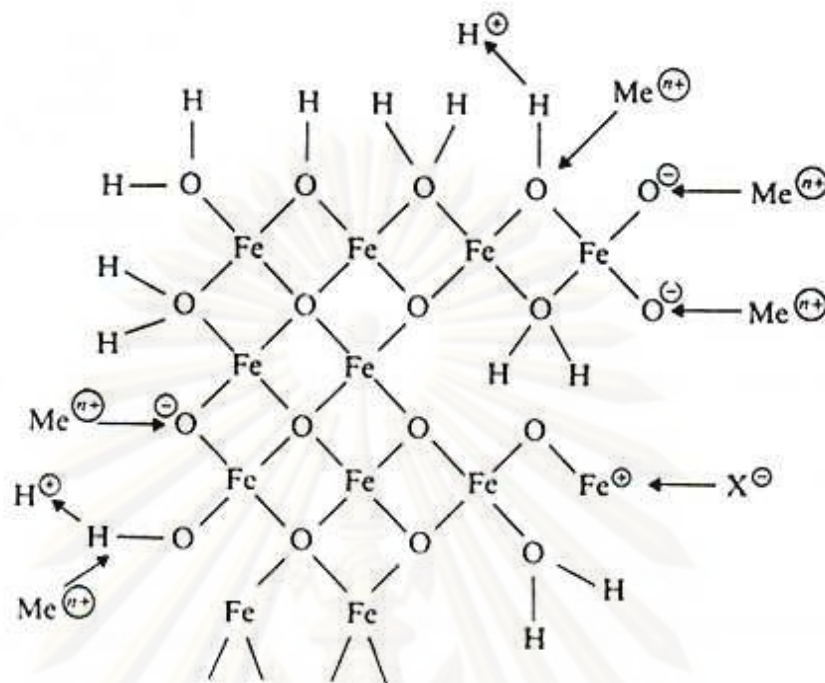
ซับซ้อนเหล่านี้อาจเกิดเพียงกระบวนการเดียว สองกระบวนการ หรือทั้งหมดร่วมกัน โดยในการศึกษานี้สนใจและกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาแบบ inner-sphere และ outer- sphere complexation (Koretsky, 2000)



รูปที่ 2.4 การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์ (Koretsky, 2000)



X^{\ominus} คือ แอนไอออน ได้แก่ PO_4^{3-} เป็นต้น

Me^{n+} คือ แคทไอออน ได้แก่ Pb^{2+} , Zn^{2+} เป็นต้น

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

2.4 ทฤษฎีฟลูอิดเซชัน

2.4.1 นิยาม

คำว่า ฟลูอิดเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างเป็นลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น เมื่อสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอคอดลงแล้วให้ของไหล (แก๊ส ของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งเหล่านั้น ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง และไหลออกทางส่วนบนของหอคอดลง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดเห็นเม็ดของแข็ง ขยับตัวและลอยขึ้นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่在这种สถานะนี้มีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็ง

ที่ประพัตติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไธซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าฟลูอิดไธเซน (สมศักดิ์ ,2528)

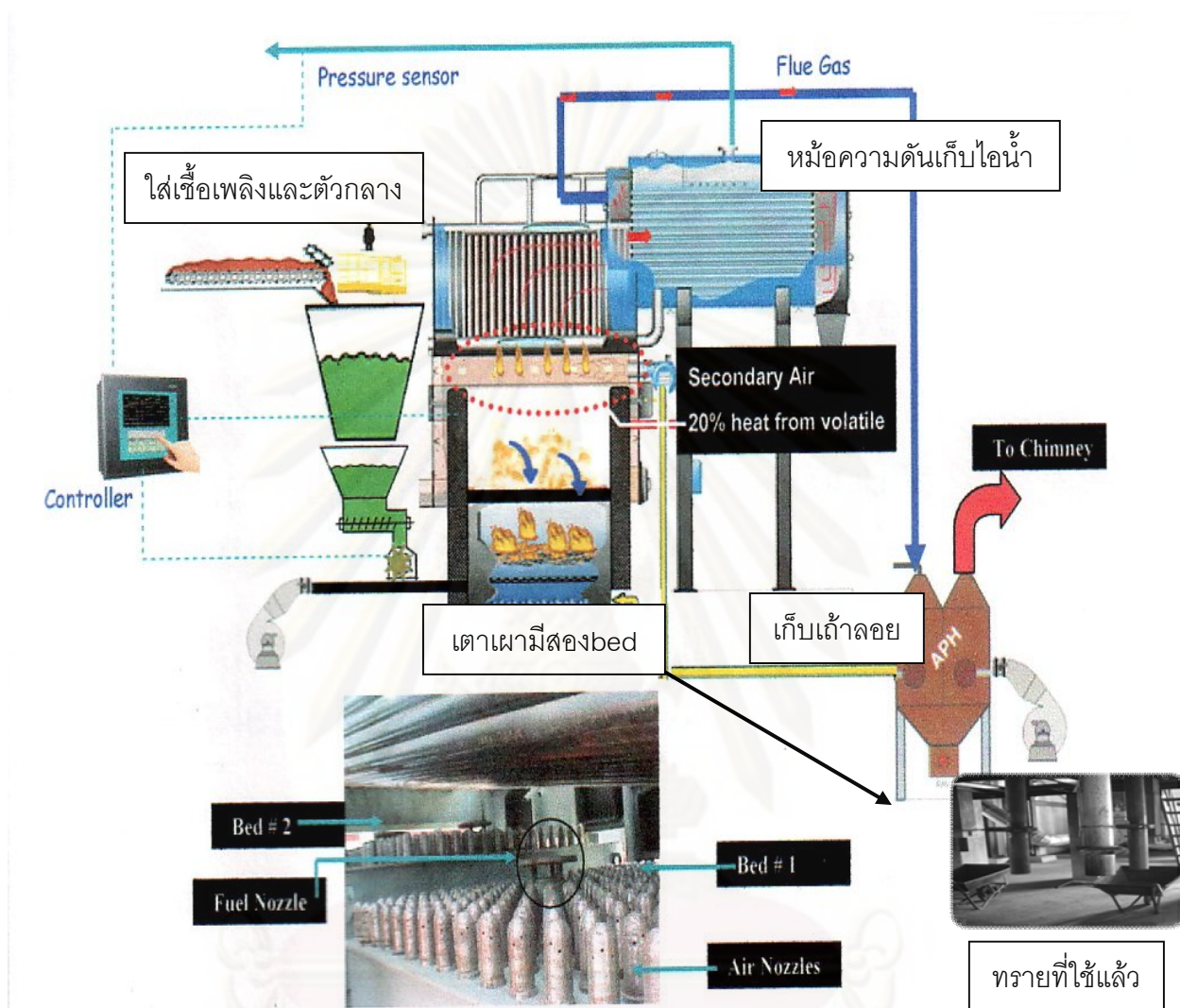
2.4.2 ประเภทของฟลูอิดไธเซน

งานของฟลูอิดไธเซน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ฟลูอิดไธเซนสองสถานะและฟลูอิดไธเซนสามสถานะ

1. ฟลูอิดไธเซนสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่าในหอทดลองหรือในเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไธซ์เบด 2 สถานะจึงแบ่งย่อยได้เป็นแก๊สฟลูอิดไธเซน (Gas Fluidization) และฟลูอิดไธเซนของเหลว (Liquid Fluidization)
2. ฟลูอิดไธเซนสามสถานะ (Three-phase Fluidization) หมายความว่าในหอทดลองหรือในเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

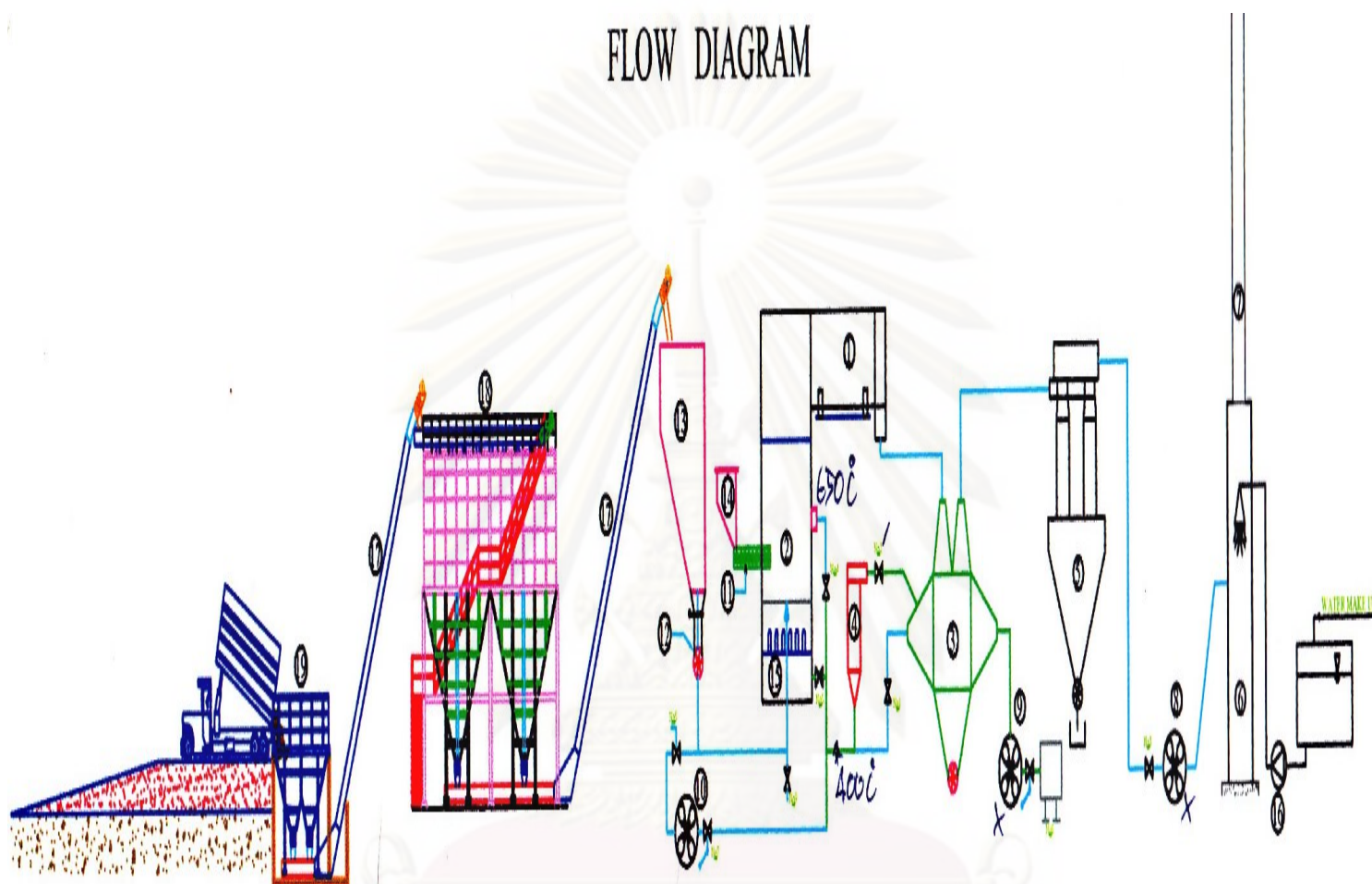
สำหรับฟลูอิดไธเซนสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไธเซนสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (bubble column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed bed) ดังนั้น จึงมีกลไกที่ซับซ้อนมากกว่า การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ชั้นสูง

2.4.3 ลักษณะการทำงานของฟลูอิดไธซ์ เบด(บริษัท ไทยโทเรเทคไทล์มิลล์ จำกัด,2551)Fluidised bed coal fired boiler เริ่มใช้งานเมื่อ วันที่ 7 เดือน กรกฎาคม 2550 ยี่ห้อ Thermax จากประเทศอินเดีย ดูแลโดยบริษัท ฟูลชีสเต็ม เอ็นจิเนียริง จำกัด สำหรับการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการผลิตหลักๆ ที่ใช้ไอน้ำ คือ กระบวนการย้อมผ้า อบผ้า อบเส้นด้าย เชื้อเพลิงและตัวกลางที่ใช้ คือ ทราย (Sand) ถ่านหิน (Coal) ถ่านไม้ (Charcoal) โดยมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบภายในเตาฟลูอิดไดซ์ เบด (บริษัท ไทยโทเรเทคไทยมิล จำกัด, 2551)

FLOW DIAGRAM



- | | | | | |
|----------------|------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------|
| ① SHELL | ⑤ CYCLONE | ⑨ FDF | ⑬ COAL BUNKER | ⑰ CONVEYOR |
| ② FURNACE | ⑥ SCRUBBER | ⑩ BOOSTER FAN | ⑭ SAND AND CHARCOAL HOPPER | ⑱ COAL SILO |
| ③ APH | ⑦ CHIMNEY | ⑪ SAND AND CHARCOAL SCREW FEEDER | ⑮ PRE-HEAT CHAMBER | ⑲ COAL DUMP PIT |
| ④ OIL START UP | ⑧ JDF | ⑫ ROTORY COAL FEEDER | ⑯ PUMP SCRUBBER | |

รูปที่ 2.7 ระบบการทำงานของเตา ฟลูอิดไดซ์เบด

ส่วนประกอบของเตาฟลูอิดไดซ์เบด

1. Coal dump pit เป็นตัวรับถ่านหินที่ลงจากรถ
2. Coal Silo ถึงเก็บถ่านหินก่อนนำไปใช้งาน
3. Coal bunker ทำหน้าที่เก็บถ่านหิน ก่อนป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้
4. Coal Checking ตรวจสอบปริมาณถ่านหินที่ใช้งาน
5. Sand and Charcoal conveyor ลำเลียงถ่านไม้และทรายขึ้นไปเก็บบน Hopper
6. Sand Screen ทำหน้าที่เป็นตะแกรง แยกทรายกับถ่านที่ถูก drain ออกจาก bed
7. Deaerator Tank ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนที่ปนในน้ำก่อนน้ำจะเข้าหม้อน้ำ
8. Ash bin เก็บขี้เถ้าที่ออกจากกระบวนการเผาไหม้

2.4.4 ปริมาณการใช้วัตถุดิบ

ปริมาณการใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการใช้ของฝ่ายผลิต ซึ่งถ่านไม้จะให้ในช่วงแรกที่เริ่มเดินระบบเท่านั้น วัตถุดิบหลักที่ใช้ คือ ทราย และ ถ่านหิน โดยมีค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณการใช้ทราย และราคา

วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้ (กก./เดือน)	ราคาต่อหน่วย (บาท/กก.)	ราคา (บาท/เดือน)	ปริมาณที่ผลิตได้ (กก./ตันไอน้ำ)	ปริมาณ ไอน้ำที่ได้ (ตัน)
ทราย	27,000	0.9	24,300	3.59	7,520
ถ่านหิน	1,175,507	2.92	3,432,480	157	7,487

ทรายจะสั่งซื้อมาจาก ท่าทรายประเสริฐ จังหวัดกาญจนบุรี ขนาดทราย 2 มม. ส่วนถ่านหินสั่งซื้อจาก Unique , Asia green และ Supakit เป็นถ่านหิน ปีทูบีนัท 5-10 มม. ให้ค่าความร้อน 6,500-6,800 kcal/kg ปริมาณทรายที่ต้องทิ้งต่อเดือน คือ 27 ตันต่อเดือน คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องส่งกำจัด ตันละ 1,300 บาท คิดเป็นเงิน 35,100 บาทต่อเดือน ปัจจุบันทางโรงงานใช้ทรายถมที่บริเวณรอบโรงงานแต่เนื่องจากมีที่จำกัด ดังนั้นจึงเป็นปัญหาในการจัดการ

2.4.5 ผลการวิเคราะห์ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์ เบด

ตารางที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ทราย (international testing service , i-test-lab)

วันที่ 11 เดือน สิงหาคม 2551

Analyses	Method*	Unit	Results	Standard**
Cr	Acid Digestion-ICP	mg/kg	5.59	2,500
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	5.0
As	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.83	500
	Leachate-ICP	mg/l	0.07	5.0
Zn	Acid Digestion-ICP	mg/kg	11.4	5,000
	Leachate-ICP	mg/l	0.08	250
Cd	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.21	100
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	1.0
Ni	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.87	2,000

	Leachate-ICP	mg/l	0.02	20
Cu	Acid Digestion-ICP	mg/kg	<0.01	2,500
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	25
Pb	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.54	1,000
	Leachate-ICP	mg/l	0.04	5.0
Ba	Acid Digestion-ICP	mg/kg	800	10,000
	Leachate-ICP	mg/l	44.6	100
Hg	Acid Digestion-ICP	mg/kg	<0.01	20
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	0.2

*method : วิธีทดสอบตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว (พ.ศ.2548) และ US EPA SW-846

**Standard : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.6 กากของเสียอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

2.4.6.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต หรือสิ่งของที่ไม่สามารถใช้งานได้ หรือไม่ต้องการใช้งานอีกต่อไป ซึ่งอาจมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ โดยจะแบ่งของเสียอุตสาหกรรมตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.6.2 การกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 19 หมวดหมู่ และมีการกำหนดรหัสเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยใช้รหัสเลข 6 หลัก *ตัวเลขสองหลักแรก* แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว *ตัวเลขสองหลักกลาง* แสดงถึงกระบวนการเฉพาะในการประกอบกิจการนั้นๆ ที่ทำให้เกิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว หรือเป็นชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว *ตัวเลขสองหลักสุดท้าย* แสดงถึงลักษณะเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น เช่นรหัส 05 07 01 หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (05) จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ (07) ที่ปนเปื้อนด้วยสารปรอท (01) เป็นต้น

ในการกำหนดรหัสที่เหมาะสมกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้พิจารณาตามขั้นตอนต่อไปนี้ คือ

- 1.) พิจารณาว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดขึ้น มาจากกระบวนการที่สอดคล้องกับ หมวด 01 ถึง หมวด 12 หรือ หมวด 17 ถึง หมวด 19 หรือไม่ โดยให้หารหัสเลข 6 หลักที่เหมาะสมในหมวดเหล่านี้ ยกเว้นรหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99

- 2.) หากไม่สามารถหารหัสที่เหมาะสมตามขั้นตอนแรกได้ ให้ตรวจสอบรหัสตามชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในหมวด 13 ถึง 15
- 3.) ถ้ายังไม่สามารถระบุได้ ให้ตรวจสอบรหัสสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหมวด 1
- 4.) หากยังไม่สามารถระบุรหัสเลข 6 หลัก จากหมวด 16 ได้ ให้กลับไปใช้รหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99 ในหมวดที่เกี่ยวข้องในข้อแรก

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลักที่กำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste – Mirror entry) ให้ถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด ในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ รหัสเลข 6 หลักของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ดังในรูปที่ 2.8 ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีรหัสคือ 19 01 19

19	ของเสียจากโรงปรับคุณภาพของเสีย โรงบำบัดน้ำเสีย โรงผลิตน้ำประปา และ โรงผลิตน้ำใช้อุตสาหกรรม (wastes from waste management facilities, off-site waste water treatment plants and the preparation of water intended for human consumption and water for industrial use)
19 01	ของเสียจากเผาของเสีย (wastes from incineration or pyrolysis of waste)
19 01 02	โลหะเหล็กที่แยกมาจากถ่านก้น (ferrous materials removed from bottom ash)
19 01 05	ตะกอนกรองจากการบำบัดก๊าซ (filter cake from gas treatment)
19 01 06	HA น้ำเสียจากการบำบัดก๊าซ (aqueous liquid wastes from gas treatment and other aqueous liquid wastes)
19 01 07	HA ของเสียที่เป็นของแข็งจากการบำบัดก๊าซ (solid wastes from gas treatment)
19 01 10	HA ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานในการบำบัดก๊าซแล้ว (spent activated carbon from flue-gas treatment)
19 01 11	HM ถ่านก้นและตะกอนที่มีสารอันตราย (bottom ash and slag containing dangerous substances)
19 01 12	ถ่านก้นและตะกอนที่ไม่ใช่ 19 01 11 (bottom ash and slag other than those mentioned in 19 01 11)
19 01 13	HM เถ้าลอยที่มีสารอันตราย (fly ash containing dangerous substances)
19 01 14	เถ้าลอยที่ไม่ใช่ 19 01 13 (fly ash other than those mentioned in 19 01 13)
19 01 15	HM ฝุ่นจากหม้อไอน้ำที่มีสารอันตราย (boiler dust containing dangerous substances)
19 01 16	ฝุ่นจากหม้อไอน้ำที่ไม่ใช่ 19 01 15 (boiler dust other than those mentioned in 19 01 15)
19 01 17	HM ของเสียจากการเผาแบบไร้อากาศ ที่มีสารอันตราย (pyrolysis wastes containing dangerous substances)
19 01 18	ของเสียจากการเผาแบบไร้อากาศ ที่ไม่ใช่ 19 01 17 (pyrolysis wastes other than those mentioned in 19 01 17)
19 01 19	ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด (sands from fluidised beds)
19 01 99	ของเสียอื่นที่ไม่ได้ระบุข้างต้น (wastes not otherwise specified)

รูปที่ 2.8 การกำหนดรหัสของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด

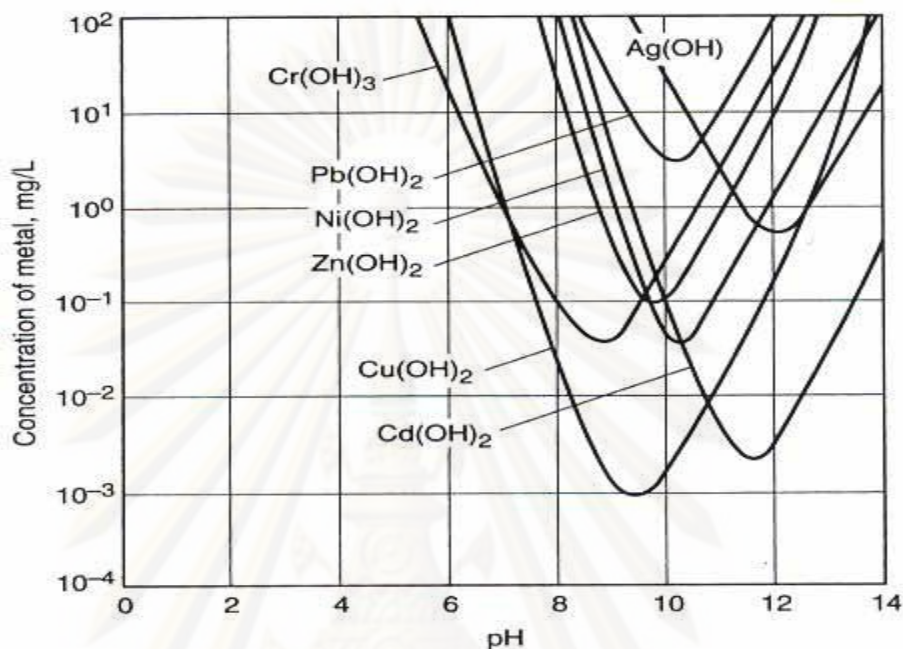
2.5 เทคโนโลยีการกำจัดแควมเมียมในน้ำ

กระบวนการที่นำมาใช้ในการกำจัดแควมเมียมออกจากรน้ำมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) หลักการของวิธีการดังกล่าวสรุปดังนี้

2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายในน้ำทำให้เกิดเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำ โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนด้วยโลหะ ซึ่งจะได้เป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ เช่น การเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO, Lime) หรือการตกตะกอนเป็นโลหะคาร์บอเนตด้วยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

นอกจากนี้โลหะหนักบางตัวสามารถกำจัดออกได้ด้วยการตกตะกอนเป็นโลหะซัลไฟด์ด้วยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โลหะหนักแต่ละชนิดสามารถตกตะกอนได้ที่พีเอชต่างกัน ในกรณีของแควมเมียมไอออน พบว่า สามารถตกตะกอนเป็นแควมเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ดีที่ค่าพีเอชระหว่าง 10 – 11 (Eckenfelder, 1989 ; Metcalf และ Eddy, 2003)



รูปที่ 2.9 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักที่ค่าพีเอชต่างๆ

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2003

Faust และ Aly (1987) ได้ศึกษากระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีที่ใช้กำจัดแคดเมียมในน้ำผิวดิน และน้ำบาดาลโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation) ใช้สารส้มและเฟอร์ริกซัลเฟต (Ferric Sulfate) เป็นสารตกตะกอน (Coagulation) ในสภาพความเป็นด่างค่อนข้างสูง (200 มิลลิกรัม/ลิตร as CaCO₃) พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 8.5-9.0 ผลการศึกษา คือเมื่อใช้เฟอร์ริกซัลเฟตทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำผิวดินและน้ำบาดาลได้ดีกว่าสารส้ม ที่ปริมาณและพีเอชเท่ากัน

2.5.2 การแลกเปลี่ยนประจุ

การแลกเปลี่ยนไอออน คือ การแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนในน้ำกับไอออนในสารละลายที่เป็นของแข็งที่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับไอออนได้ สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน ได้นี้

เรียกว่า เรซิน (Resin) มี 2 แบบ คือเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Resin) (มันสิน, 2542) และ Faust และ Aly (1998) กล่าวว่าการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำได้ดินด้วยประสิทธิภาพ 90 -100 เปอร์เซ็นต์

Zhao และคณะ (2002) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมที่มีปริมาณในน้ำดื่ม ด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบเบสอ่อน (Weak base anion exchange resin) โดยอาศัยอันตรกิริยาระหว่างเรซินซึ่งทำหน้าที่เป็นลิวอิสเบส (Lewis Bases) และโลหะหนักในสารละลายจะทำหน้าที่เป็นลิวอิสกรด (Lewis Acids) นอกจากนี้ยังสามารถนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ

2.5.3 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการนี้อาศัยเมมเบรน (Semi-Permeable Membrane) ในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย กระบวนการเมมเบรนที่นิยมใช้กำจัดแคดเมียมมี 2 แบบ คือ การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis) และการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ซึ่งความแตกต่างของทั้ง 2 กระบวนการนี้ อยู่ที่ความสามารถในการแยกสารละลายที่มีขนาดต่างๆกัน รวมถึงแรงดันที่ทำให้เกิดการแยกไอออนออกจากน้ำด้วย

การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนให้ออกจากน้ำ โดยแผ่นเยื่อเมมเบรนที่ใช้ มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ แผ่นบวกจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบและปล่อยสารที่มีประจุบวกผ่านไป ส่วนแผ่นลบจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวกและปล่อยสารที่มีประจุลบผ่านไป โดยที่โมเลกุลของน้ำไหลผ่านได้ยาก ทำให้สามารถแยกไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำได้ Faust และ Aly (1988) กล่าวว่า การใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับที่มีเมมเบรนขนาดต่างๆกันจำนวน 5 ชนิด สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำได้ประสิทธิภาพมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์

2.5.4 การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ดูดซับแคดเมียม

การกำจัดสารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับไมโครกุล โดยอาศัยความสามารถของสารบางชนิดในการดักไมโครกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน (มันสิน, 2542) ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากพอที่จะทำได้ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ ดังเช่นการศึกษาของ (Ramos และคณะ, 1997) ได้นำมาดูดซับแคดเมียมในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) มีการแปรผันอุณหภูมิ 10, 25 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แปรผันพีเอชจาก 2 ถึง 8 ผลจากการทดลองพบว่าการดูดซับแคดเมียมจะลดลง 3 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 10 ถึง 40 องศาเซลเซียสพบว่าแคดเมียมไอออนจะไม่สามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่พีเอชเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่านอกจากนี้ จะเกิดการตกตะกอนเป็นแคดเมียมไฮดรอกไซด์ที่พีเอชมากกว่า 9 ซึ่งความสามารถในการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นที่พีเอช 8 และจะลดลงเป็น 12 เท่าเมื่อลดพีเอชจาก 8 ถึง 3

Faust และ Aly (1987) รายงานว่าการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงและแบบเกล็ด พบว่าถ่านกัมมันต์แบบผงมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าแบบเกร็ดที่ปริมาณ พีเอชและระยะเวลาเท่ากัน และเมื่อได้ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับโลหะไปนานๆ จะเกิดการอุดตันขึ้น ทำให้หมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้นจึงต้องทำการรีเจนเนอเรท (Regenerate) เป็นช่วงๆ

2.5.5 การใช้โลหะออกไซด์

โลหะออกไซด์ ได้แก่ แมงกานีส เหล็กและอะลูมิเนียม สามารถดูดซับแคดเมียมในรูปสารละลาย แมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับแคดเมียม ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 5 - 8.5 (Faust และ Aly, 1987)

2.5.6 มาตรฐานการควบคุมแคดเมียม

มาตรฐานการปนเปื้อนของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในสิ่ง แวดล้อม ที่กำหนด โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในสิ่งแวดล้อม

มาตรฐาน	แหล่งที่มา	ค่ามาตรฐาน
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะที่ปิดสนิท	ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524	ไม่เกิน 0.01 มก./ล.
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 332 พ.ศ.2521	ไม่เกิน 0.01 มก./ล.
มาตรฐานคุณภาพน้ำอุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 4 พ.ศ.2521	ไม่เกิน 0.01 มก./ล.
มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินที่มีใช้ทะเล	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537	ไม่เกิน 0.05 มก./ล.ในกรณีที่มีน้ำกระด้างในรูป CaCO_3 ไม่เกิน 100 มก./ล. และไม่เกินไป 0.05 มก./ล. ในกรณีที่น้ำมีความกระด้างในรูป CaCO_3 เกิน

		กว่า 100 มก./ล.
มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อ บาดาล	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2521	ไม่เกิน 0.1 มก./ล.
มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม	ประกาศ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.
มาตรฐานน้ำดิบ	การประปาส่วนภูมิภาค	ไม่เกิน 0.01 มก./ล.
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา	การประปานครหลวง	ไม่เกิน 0.003 มก./ล.

ที่มา : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2544)

2.6 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 สถานะ โดยดึงโมเลกุลที่อยู่ในของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โมเลกุลที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารดูดติดผิว

(Adsorbent) การดูดติดผิวสามารถใช้ในการบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี

2.6.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism) (Eckenfelder, 1981)

การดูดติดผิวที่สำคัญมี 2 แบบคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การกระจายตัว (Dispersion) การเหนี่ยวนำ (Induction) และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุลคือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วการดูดติดผิวจะเกิดแบบกระจายตัวทำให้พลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลเข้ามาเกาะติดได้ การดูดติดผิวทางเคมีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งจะแตกต่างจากการดูดติดผิวแบบกายภาพ เพราะกระบวนการนี้จะมีการถ่ายเทมวลสารจึงทำให้เกิดการดูดติดผิวด้วยพันธะเคมีกับส่วนที่เกิดปฏิกิริยาของสารดูดติดผิวโดยทั่วไปการดูดติดผิวทางเคมีจะมีความแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ของการดูดติดผิวทางกายภาพ

ธิยา (2542) พบว่าปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประเภทของกระบวนการดูดซับโดยพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารถูกดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) จะถูกดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้
การดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

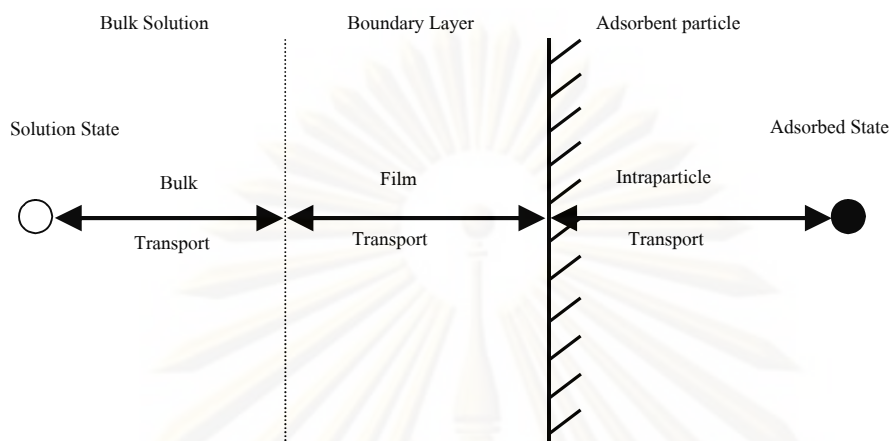
ที่มา : ธิยา (2542)

2.6.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer) (Eckenfelder, 1981)

อัตราการดูดติดมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราการดูดติดที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล กลไกการดูดติดมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่หุ้มสารดูดติด
2. การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติด การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดขั้นต้นหนึ่ง
3. การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดติด (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดภายใน จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดเช่นเดียวกัน

การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติด แต่ถ้ามหาว่าระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติด ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดติดมายังสารดูดติด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

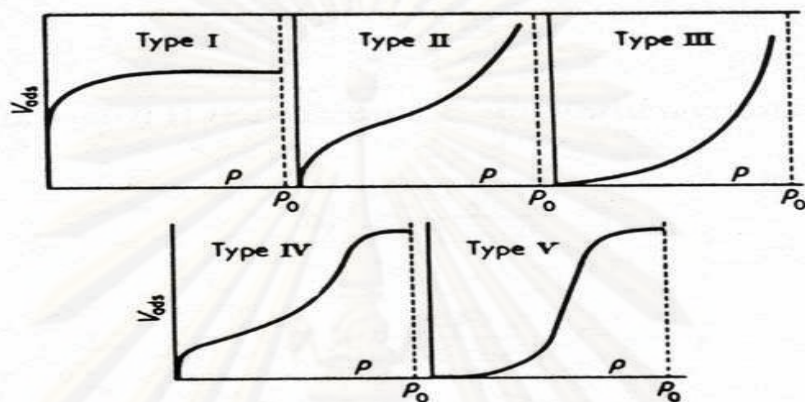
2.6.3 สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดผิว ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่อากาศละลาย เมื่อปริมาณของการดูดติดผิวและหลุดออกจากผิวมีปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจากผิวจะเข้าสู่สภาวะคงที่ซึ่งเรียกว่า สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดติดผิว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดติดผิว ค่าพีเอช อุณหภูมิ และอื่น ๆ การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

2.6.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิว แสดงถึงลักษณะของกระบวนการดูดติดผิว และปริมาณของสารถูกดูดติดผิวบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบดังรูปที่ 2.11

ซึ่งไอโซเทอมแบบที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่ 2 ถึง 5 เป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน ที่มา: Faust and Aly (1987)

1.) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้อธิบายกระบวนการดูดติดผิวในระบบของเหลว มีสมการดังนี้

$$X/M = K C_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ

X/M = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว หน่วย มก./ก.

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก./ล.

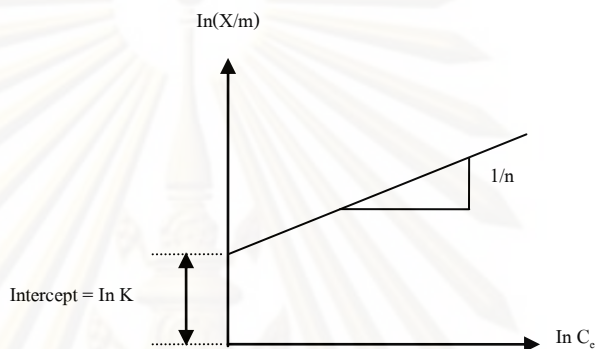
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ (3) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{Log } (X/M) = \text{log } K + (1/n) \text{ log } C_e \quad (4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/M)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ แสดงดังรูปที่ 2.12 ถ้าค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี และถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพรุนด์ลิช ที่มา: Sunstrom และ Klei (1979)

2.) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ หรือเรียกว่า localized monolayer model คือ โมเลกุลถูกดูดติดผิวอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิวแต่ละโมเลกุลเกิดการดูดติดผิวได้โมเลกุลเดียวโดยพื้นที่บริเวณดูดติดผิวมีค่าที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว และพลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ (5)

$$\frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \quad (5)$$

เมื่อ X/M = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิว หน่วย มก./ก.

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก./ล.

a = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิวที่ต้องการสำหรับการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว หน่วย มก./ก.

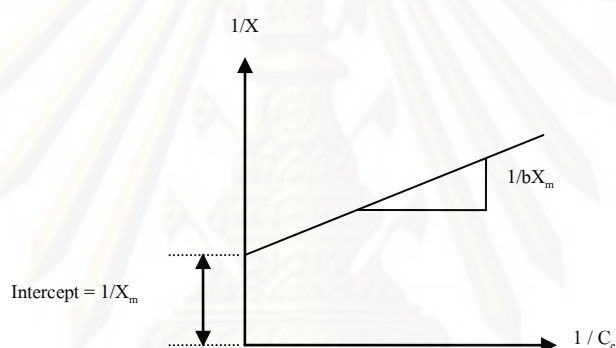
b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ (5) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{X/M} = \frac{1}{ab} + \frac{C_e}{a} \quad (6)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{X/M} = \frac{1}{abC_e} + \frac{1}{a} \quad (7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/(X/M)$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรง สามารถหาค่าคงที่ a และ b ได้จากความชันและจุดตัดแกน ดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์

ที่มา: Sunstrom และ Klei (1995)

2.6.5 การทดลองด้วยคอลัมน์ดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับจะสามารถพิจารณาเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมได้ แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้อาจไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการออกแบบกระบวนการดูดซับ จึงต้องมีการทดลองโดยใช้คอลัมน์ดูดซับ (Column Test)

การทดลองโดยใช้คอลัมน์ดูดซับโดยการใช้วิธีการคำนวณตามสมการจลศาสตร์ ของ Thomas ซึ่งสมการจลศาสตร์นี้ ประยุกต์มาจากการ สมการของ Bohart and Adams โดยส่วนใหญ่แล้วข้อมูลที่ต้องการจาก การทดลอง คือ เบรคทูร์ เคฟ (Breakthrough curve) จากการทดสอบ คอลัมน์ดูดซับ

สมการของ Thomas สำหรับคอลัมน์การดูดซับแสดงได้ตามนี้

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{\frac{k_1(q_0M - CoV)}{Q}}} \quad (8)$$

เมื่อ

C	=	ความเข้มข้นของสารละลายขาออก
C ₀	=	ความเข้มข้นของสารละลายขาเข้า
k ₁	=	อัตราค่าคงที่
q ₀	=	ความเข้มข้นสูงสุดที่สารละลายดูดซับบนตัวดูดซับ (กรัมต่อกรัม)
M	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ กรัม
V	=	ปริมาตรที่บำบัดได้ ลิตร
Q	=	อัตราการไหล ลิตรต่อชั่วโมง

ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสมการด้านซ้ายเท่ากับด้านขวา

$$1 + e^{\frac{k_1(q_0M - CoV)}{Q}} = \frac{C_0}{C} \quad (9)$$

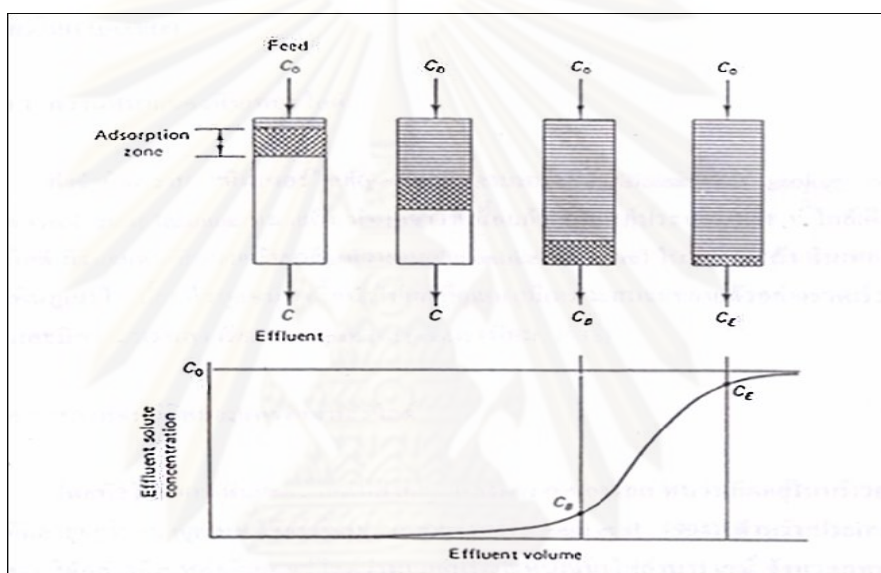
เทค log ทั้งสองข้างของสมการ ได้เป็น

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1q_0M}{Q} - \frac{k_1CoV}{Q} \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 สามารถนำไปสร้างสมการเส้นตรงได้ $y = mx + b$ โดยในเทอมของ $y = \ln(C_0/C - 1)$, $x = V$, $m = k_1C_0/Q$ และ $b = k_1q_0M/Q$

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ของชั้นตัวดูดซับ ตัวดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อนและชั้นของตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาการใช้งาน ดัง รูปที่ 2.14 ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนในที่สุดความเข้มข้นจึงถึงค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ที่จุดนี้เรียกว่าจุดเบรคทูร์จ (Break Through point) โดยเวลาที่นับจาก

เริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดเบรคทูร์จ์ เรียกว่าเวลาการใช้งาน (Service Time) (เสริมพล และไชยยุทธ ,2524) และเมื่อตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับได้อีก เรียกว่า จุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ เรียกว่า จุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ (Exhaust Point) ซึ่งจุดนี้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (C_E) จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบ (C_0)



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนตัวของ Adsorption Zone สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย ที่มา: Sundstrom และ Klei (1979)

ในการทดลองถ้าวัดความเข้มข้นที่จุดต่างๆภายในคอลัมน์จะได้กราฟความเข้มข้นของสารลดลงเรื่อยๆ จากความเข้มข้นเท่ากับน้ำเสียขาเข้า ออกจนเป็นความเข้มข้นเป็นศูนย์ โดยกราฟนี้จะค่อยๆเคลื่อนที่เข้าไปเรื่อยๆจากปลายด้านหนึ่งของคอลัมน์ (ขาเข้าของน้ำเสีย) ไปยังปลายขาออกของน้ำเสีย เพราะช่วงแรกๆตัวดูดซับถูกใช้งานก่อน และเมื่อพื้นที่ผิวเต็มก็จะไม่ดูดซับอีกต่อไป ดังนั้นจึงเกิดการลดลงของความเข้มข้น เรียกส่วนที่เกิดการดูดซับนี้ว่า Mass Transfer Zone (MTZ) และเมื่อ MTZ เคลื่อนที่จนถึงปลายขาออกของน้ำเสีย ซึ่งจะพบว่า มีสารบนตัวดูดซับส่วนหนึ่งที่เล็ดลอดออกไปกับน้ำเสีย เรียกจุดที่น้ำเสียเริ่มมีสารถูกดูดซับเจือปนออกมาว่าจุดเบรคทูร์จ์(Break Through point) ซึ่งเป็นจุดที่คอลัมน์ไม่สามารถทำงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์อีก

เวลาการใช้งาน (Service Time) จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- 1) ความสูงของชั้นตัวดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มชั้นความสูงของตัวดูดซับ และจะลดลงเมื่อความสูงของตัวดูดซับลดลง
- 2) พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ (Specific Surface Area) ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้เวลาการใช้งานมากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย
- 3) อัตราการกรอง จะส่งผลต่อเวลาในการใช้งานของตัวดูดซับ คือ ถ้าอัตราการกรองสูงจะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าอัตราการกรองต่ำ
- 4) ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบจะส่งผลต่อเวลาการใช้งาน เมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสูง จะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ

การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ สามารถเลือกใช้ได้ ดังนี้

- 1) การไหลลง (Down Flow) คือการให้น้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก แต่เมื่อตัวดูดซับเสื่อมสภาพจะต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ทั้งคอลัมน์
- 2) การไหลขึ้น (Up Flow) คือการให้น้ำที่ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับชั้นข้างบน สามารถฟื้นฟูสภาพของชั้นตัวดูดซับที่หมดสภาพแล้วเป็นระยะๆ โดยเอาตัวดูดซับออกด้านล่างคอลัมน์ เมื่อนำไปทำการฟื้นฟูสภาพแล้ว สามารถนำกลับมาใส่ในส่วนบนของคอลัมน์

2.6.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว

1.) **ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว** ความสามารถในการดูดติดผิว (adsorption capacity) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดติดผิวโมเลกุลได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อยส่วนอัตราการดูดติดผิวจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว ถ้าสารดูดติดผิวขนาดเล็กจะมีอัตราการดูดติดผิวมากกว่าสารดูดติดผิวขนาดใหญ่

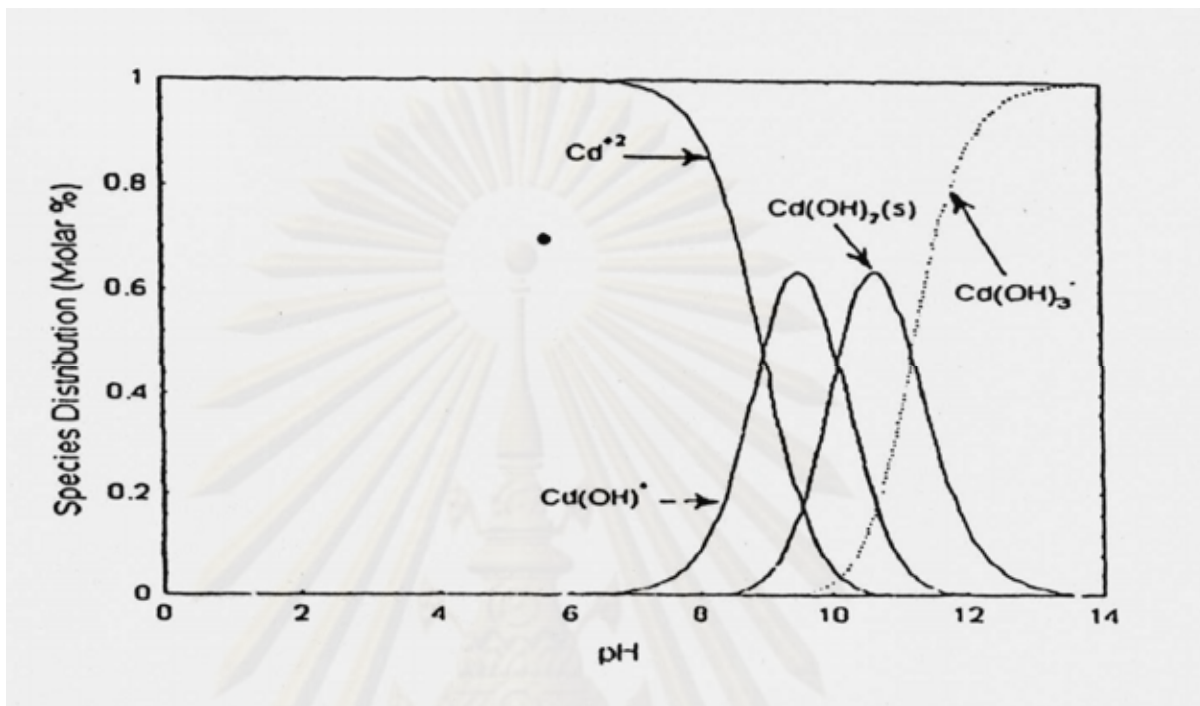
2.) **ลักษณะของสารถูกดูดติดผิว** เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง จะเกิดการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำ

ละลายแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะถูกดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิว ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว ดังนั้นการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อยหรือเข้ากับโพรงได้พอดี โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะเข้าไปในโพรงก่อนโมเลกุลขนาดใหญ่

3.) ค่าพีเอช (pH) ค่าพีเอชทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสาร ค่าพีเอชจึงมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว ซึ่งไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้ดี และค่าพีเอชของสารละลายยังมีผลกระทบต่ออัตราการดูดติดผิวของไอออนอื่น ๆ โดยไอออนบวกจะถูกดูดติดผิวได้ดีที่พีเอชสูง ๆ และไอออนลบจะถูกดูดติดผิวได้ดีภายใต้สภาวะที่เป็นกรดการดูดติดผิวโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) โดย Fe-OOH (Iron- Oxide) ขึ้นอยู่กับพีเอชด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อรูปแบบ (Species) ของโลหะ เช่น แคดเมียมไอออนจะมีรูปแบบต่างๆกันขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย Ramos และคณะ (1997) กล่าวว่า ที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 7 แคดเมียมจะอยู่ในรูปแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) เป็นส่วนใหญ่ แต่ค่าพีเอชสูงขึ้นแคดเมียมไอออนจะมีการรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ เช่น $\text{Cd}(\text{OH})^+$ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ และ $\text{Cd}(\text{OH})_3^+$ ดังรูปที่ 2.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



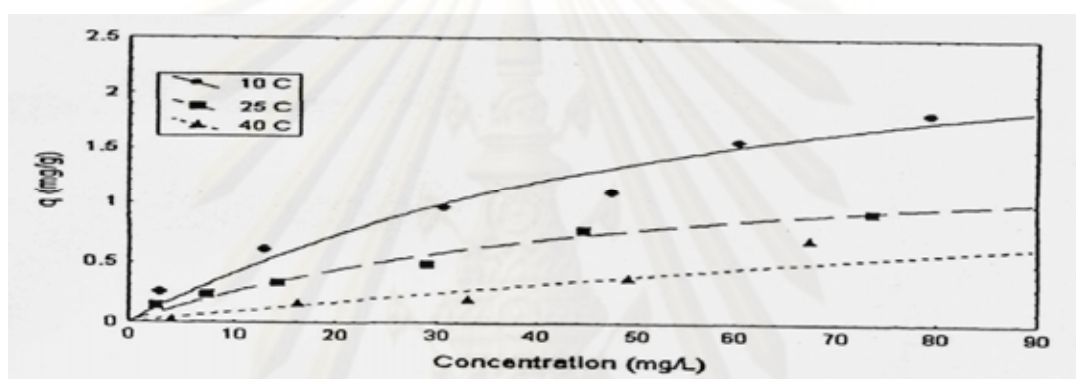
รูปที่ 2.15 สารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมในสารละลายพีเอชต่างๆ

ที่มา : Ramos และคณะ, 1997

4.) **ความปั่นป่วน** อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ จะทำให้น้ำมีชั้นฟิล์มหนามากขึ้นโมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดติดผิวได้ช้า ดังนั้นการแพร่ผ่านฟิล์ม จึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิวของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง จะทำให้น้ำมีฟิล์มบางลงโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าสู่สารดูดติดผิวได้เร็วกว่า การแพร่เข้าสู่รูพรุน ดังนั้นอัตราเร็วการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวจึงขึ้นอยู่กับ การแพร่เข้าสู่รูพรุน

5.) **เวลาสัมผัส** เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิวด้วย

6.) **อุณหภูมิ** การดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนโดยอุณหภูมามีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดติดผิว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้นด้วยการดูดติดผิวจึงน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (มันสิน, 2542) ดังรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 10 เป็น 25 และ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของแคดเมียมไอออนบนถ่านกัมมันต์

ที่มา : Ramos และคณะ, 1997

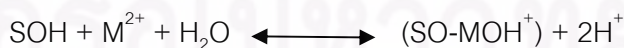
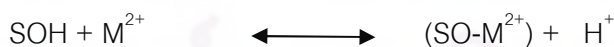
7.) **ถังกรองดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorption Column)** ผลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิว นำมาใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดวัสดุกรองที่มีความเหมาะสมได้ แต่ข้อมูลที่ได้นั้นยังคงไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองโดยใช้ถังกรองดูดติดผิว (column test) เพื่อหาอายุการใช้งานของสารดูดติดผิวที่เลือกใช้ว่ามีอายุการใช้งานนานเท่าใด สารดูดติดผิวนั้นจึงจะเสื่อมคุณภาพ (Sunstrom และ Klei, 1979) เมื่อนำน้ำที่ปนเปื้อนมาผ่านคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุกรองอย่างต่อเนื่องหลังจากน้ำไหลผ่านชั้นสารดูดติดผิวเป็นระยะเวลาหนึ่ง สารดูดติดผิวชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อนและชั้นต่อมาจะมีประสิทธิภาพลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลา ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดติดผิวแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถยอมรับได้แสดงว่าคอลัมน์หมดประสิทธิภาพการดูดติดผิวแล้ว เรียกจุดนี้ว่า จุดสิ้นสุดสภาพ

(breakthrough point) โดยอายุการใช้งานคอลัมน์ (service time) คือ เวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทวร์จ์ อายุการใช้งานนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ถ้าให้ความสูงของชั้นสารดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเวลาการใช้งานจะเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นน้ำเสียและอัตราการกรองสูงจะทำให้มีอายุการใช้งานต่ำ และถ้าสารดูดติดผิวมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะทำให้มีอายุการใช้งานมากกว่า สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

2.7 การดูดติดผิวด้วยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

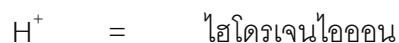
2.7.1 ลักษณะของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (Hydrous Metal Oxide) คือ ของแข็งที่ประกอบด้วยไอออนโลหะประจุบวกตั้งแต่ 1 ขึ้นไป รวมตัวกับอนุภาคของน้ำคือ ไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังนั้นไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์จึงรวมถึงสารประกอบโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ (-O) ไฮดรอกไซด์(-OH) และออกซีไฮดรอกไซด์ (-OOH) ไฮดรอกไซด์ของเหล็กกระจายอยู่ทั่วไปในดินเหนียวหรือตะกอน โดยเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุนั้น ๆ และอยู่ในรูปของออกไซด์ รูปแบบทางเคมีของเหล็กออกไซด์และไฮดรอกไซด์มักจะอยู่ในรูปของ Fe^{3+} เช่น $Fe(OH)_3$, Fe_3O_4 และ $\alpha - FeOOH$ เป็นต้น ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์แสดงลักษณะที่เป็นทั้งกรดและเบสในน้ำ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวหน้าของออกไซด์สามารถจับหรือปล่อยโปรตอน ทำให้ออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยานั้นย้ายโปรตอนและมีประจุเกิดขึ้นบนพื้นผิวของมัน คุณสมบัติที่สำคัญของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์คือ ความเป็นกรดของพื้นผิว เนื่องจากการที่ผิวมีหมู่ฟังก์ชันนั้นมีความสัมพันธ์กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมต่อของผิว เช่น ปฏิกิริยาการดูดติดผิวและการจับตัวเป็นก้อนไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวจะเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้เช่นเดียวกับลิแกนด์อื่นในสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



เมื่อ SOH = พื้นผิวไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

M^{2+} = ไอออนประจุบวกสอง



นอกจากนี้ ได้มีการแนะนำหลักการของ Zero Point of Charge (ZPC) หรือ Isoelectric Point of the Solid (IEP(s)) (Park, 1967 อ้างถึงใน Forrtner และ Wittman, 1984) กล่าวคือ ทั้งสองค่านี้ใช้ค่าพีเอชเป็นตัวแปรหลัก ซึ่ง ZPC เป็นค่าพีเอชที่ประจุไฟฟ้าที่ผิวของแข็งจากทุกแหล่งกำเนิดเท่ากับศูนย์ยกตัวอย่าง เช่น ไฮดรอกไซด์จะแลกเปลี่ยนไอออนบวกในสภาวะต่างเมื่อพื้นที่ผิวมีประจุลบ ในทางกลับกันถ้าอยู่ในสภาวะกรดและประจุที่พื้นผิวเป็นบวกจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบตารางที่ 2.10 แสดงค่า (ZPC ของสารดูดติดผิว (Adsorbent) สำหรับโลหะหนักในน้ำธรรมชาติ

ตารางที่ 2.10 แสดงค่า ZPC ของสารดูดติดผิว (Adsorbent) สำหรับโลหะหนักในน้ำธรรมชาติ

OXIDE	ZERO POINT OF CHARGE
α -quartz, SiO	2.5 (1.5-3.5)
SiO gel	1.0-2.5
Mn (II) manganite	1.8
α -MnO ₂	2-4.5
Gothite, α -FeOOH	6.7 (6.1-6.7)
Fe ₂ O ₃ .XH ₂ O	8.5
Gibbsite, α -Al(OH) ₃ and all oxide and	9 (9.1-9.3)

hydroxides Kaolin	
Montmorillonite	<2.5

ที่มา: Forstner และ Wittman (1984)

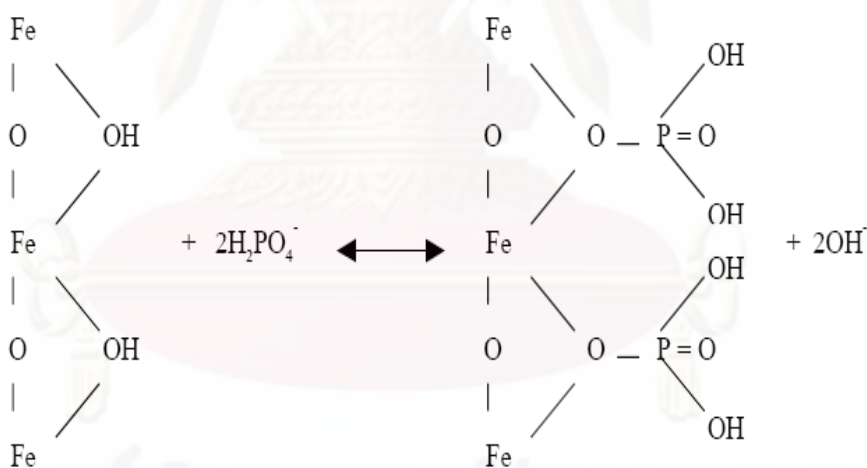
2.7.2 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในเวลาเล็กน้อย การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ของพื้นผิวที่พร้อมจะรับไอออนจากสารละลาย ซึ่งการดูดติดผิวตัวถูกละลายบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์จะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของสารที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ โดยรวมถึงส่วนประกอบทางเคมี การกระจายขนาดอนุภาค รูปร่างลักษณะของสาร พื้นที่ผิวสัมผัส ความพรุนปริมาณและธรรมชาติของบริเวณพื้นผิวที่ดูดติดผิวได้ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการดูดติดผิวไอออนต่าง ๆ บนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ โดยการดูดติดผิวไอออนบวกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น แต่การดูดติดผิวไอออนลบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าพีเอชต่ำและจะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น

สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดติดผิวไอออนบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิว และไอออนชนิดอื่น ๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายซึ่งรบกวนการดูดติดผิวบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์กลไกการดูดติดผิวไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ คือ เมื่อโลหะออกไซด์สัมผัสกับน้ำจะเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่พื้นผิวของโลหะในชั้นแรกไอออนของโลหะที่ชั้นผิวหน้าของออกไซด์ยังแห้งอยู่เพราะโมเลกุลของน้ำยังไม่เข้าไปจับ เมื่อน้ำเข้าไปจับตรงที่ว่างอยู่จะเกิดพันธะได้โดยการดูดติดผิวทางเคมี ทำให้พื้นผิวหน้ากลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโปรตอนที่ได้จากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดติดผิวไว้แล้ว โปรตอนนี้จะแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำมายังออกซิเจนไอออนที่อยู่ในชั้นผิว ซึ่งอาจมีการดูดติดผิวน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีกบนพื้นผิวที่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Dzombak และ Morel, 1990)

2.7.3 การดูดติดผิวไอออนลบด้วยไฮดรอกไซด์

ความสามารถในการดูดติดผิวและการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ เป็นกลไกที่สลับซับซ้อนและยังไม่เป็นที่ทราบกันอย่างแน่ชัด แต่ถ้าพิจารณาการดูดติดผิวเป็นหลัก ไอออนประจุลบที่ถูกดูดติดผิวจะเป็นการดูดติดผิวที่จำเพาะเจาะจง (Specific Adsorption) หรือการดูดติดผิวเชิงเคมี (Chemical Adsorption) ซึ่งการดูดติดผิวนี้เกิดจากแรงดูดยึดแบบไฟฟ้าสถิตย์ หรือแบบคูลอนน์โดยปริมาณที่ดูดติดผิวไม่จำเป็นต้องมีสมมูลเท่ากับประจุบวกบนผิวสารดูดติดผิว นอกจากนั้นดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักจะเกิดการดูดติดผิวไอออนประจุลบได้ดี เช่น CrO_4^{2-} , AsO_4^{3-} และ SeO_4^{2-} เป็นต้น ฟอสเฟตเกิดการดูดติดผิวแบบจำเพาะเจาะจงและไอออนประจุลบของฟอสเฟตจะเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับหมู่ฟังก์ชันนัล (-OH) หรือ H_2O บนผิวแร่เหล็กออกไซด์การแลกเปลี่ยนลิแกนด์จะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง ดังภาพที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่าง H_2PO_4^- กับหมู่ -OH บนผิวของแร่เหล็ก

ออกไซด์ ที่มา: (ไพบูลย์, 2544 อ้างถึงใน พงศ์ภัทร ศรีขจร, 2549)

จากภาพที่ 2.17 PO_4^{3-} จะเกิดการดูดแบบจำเพาะเจาะจง และออกซิแอนไอออนจะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่างแอนไอออนในสารละลาย กับหมู่ฟังก์ชันนัล -OH หรือ H_2O บนผิวของแร่เหล็กออกไซด์ ซึ่งการแลกเปลี่ยนลิแกนด์จะเป็นไปได้ดีขึ้น เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง

2.8 การบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

การบำบัดน้ำเสียที่มีแคดเมียมด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ส่วนใหญ่การบำบัดโลหะออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีดูดติดผิวตัวกลาง สารดูดติดผิวที่นิยมใช้เป็นเหล็กออกไซด์ที่ไม่มีรูปพรรณสัณฐาน (Amorphous Iron Oxide) เรียกว่า เฟอริไฮโดรท์ (ferrihydrite) ใช้เติมในระบบบำบัดในรูปผลึกของเหล็ก (Iron Salts) เพื่อช่วยในการตกผลึกของโลหะออกไซด์และโลหะไฮดรอกไซด์ การบำบัดโลหะด้วยวิธีนี้มีความสำคัญมากแต่มีข้อเสียคือการดูดติดผิวจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารดูดติดผิวมากขึ้นซึ่งจะเกิดสลัดจ์มากขึ้นตามไปด้วย รวมถึงค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีและการกำจัดสลัดจ์ก็ย่อมสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการใช้เฟอริไฮโดรท์จะต้องมีปริมาณน้อยที่สุดและต้องเกิดประโยชน์สูงสุดจากเหตุผลข้างต้นจึงมีการปรับปรุงข้อเสียของการดูดติดผิวบนเฟอริไฮโดรท์ โดยนำเฟอริกออกไซด์มาเคลือบบนผิวทราย ซึ่งจากการวิจัยพบว่าเฟอริกออกไซด์เป็นสารที่ง่ายต่อการฟื้นฟูอำนาจ และสามารถดูดติดผิวได้ทั้งโลหะไอออนบวกและไอออนลบโดยขึ้นกับพีเอชของสารละลายเป็นสำคัญ ซึ่งไอออนบวกจะถูกบำบัดที่พีเอชสูง ๆ และไอออนลบจะถูกบำบัดภายใต้สภาวะที่เป็นกรด สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวกลางต้องทำในสภาวะตรงข้ามกับที่กล่าวมา ดังนั้นการใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียและประหยัดค่าใช้จ่าย

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

นคร ศรีธวัช (2549) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ในสารละลายโดยใช้เหล็กออกไซด์ จากสเกลเหล็ก โรงงานผลิตเหล็กร้อนเป็นตัวดูดซับ โดยผลการศึกษาแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า เหล็กออกไซด์กำจัดแคดเมียมไอออน (II) ได้ดีที่พีเอช 9 และใช้เวลาถึงจุดสมดุล 36 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 72 ผลการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ดูดซับ พบว่าที่ความสูง 80 ซม. มีเวลาใช้งานจนถึงจุดเบรคทอร์จ 66 ชั่วโมง ปริมาณที่บำบัดจนมีค่าความเข้มข้นแคดเมียมเหลืออยู่ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน

50.36 ลิตร และดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ต่อน้ำหนักเหล็กออกไซด์ (X / M) 0.0174 มก./ก. ผลการคำนวณตามสมการ Bohart Adams พบว่า ความจุของการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) (No) 55.44 มก./ลิตร ของเหล็กออกไซด์ หรือ (X/M) 0.022 มก./ก. และค่าคงที่อัตราการดูดซับ (K) 0.15 ล./มก.-ชม.

พงศ์ภัทร ศรีขจร (2549) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม (VI) ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ จากผลการศึกษาพบว่า ทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า มีลักษณะการดูดติดผิวแบบสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ในการศึกษาอายุการใช้งานและผลของ ความสูงของชั้นทรายเคลือบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ในการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้น 4.0 พบว่า อายุการใช้งานในการกำจัดโครเมียมประมาณ 2 ชั่วโมง ในการศึกษาผลของการฟื้นฟูประสิทธิภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ภายหลังจากฟื้นฟูประสิทธิภาพสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

เบญจวรรณ วงศ์ศิริ (2547) ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการดูดซับเพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงออกจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ผลการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบแบบที่ 1 (Modified Adsorption Method) คือใช้สารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่พีเอชของสารละลายเหล็กเท่ากับ 12.0 ต่อซิลิกาเจล 5 กรัม ที่ผ่านการอบมาก่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากเคลือบแล้วซิลิกาเจลที่ได้มีความสามารถในการจับกับโลหะหนักสูงขึ้น

Boujelben และคณะ (2008) ทำการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากสารละลาย โดยใช้วัสดุธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาวัสดุที่ใช้ดูดซับ 3 ตัว

ด้วยกัน คือ ทรายสังเคราะห์ ทรายแม่น้ำ และ เศษอิฐ เคลือบเล็กออกไซด์ ผลการวิจัยพบว่า ทั้งสามตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและปริมาณ เหล็กออกไซด์สูง สามารถกำจัดฟอสฟอรัส ออกจากน้ำได้ และเห็นได้ว่าเหล็กที่สะสมบนทรายและอิฐ คือ $FeOOH$ นอกจากนี้การดูดซับ จะขึ้นอยู่กับพีเอชโดยฟอสฟอรัสจะถูกกักไว้มากสุดที่พีเอชประมาณ 5

Chang yoon-young และคณะ (2008) ทำการศึกษาการกำจัด อาร์เซนิก ในคอลัมน์ ด้วยทรายเคลือบเหล็ก (ICS) และทรายเคลือบแมงกานีส (MCS) ทดลองโดยให้ MCS อยู่ล่าง และ ICS อยู่บน โดยผ่านกระบวนการออกซิเดชันและดูดซับ พบว่า การดูดซับ อาร์เซนิก (V) บน ICS มากกว่า อาร์เซนิก (III) และพบว่ายังช่วยในการออกซิเดชัน As (III) เป็น As (V) และ พบว่าการใช้ MCS ดูดซับ As (V) ดีพอกับการ ออกซิเดชัน As (III) จุดเบรคทอร์จอยู่ที่ 18 ชั่วโมง สามารถกำจัดอาร์เซนิกได้ทั้งหมด 79 mg/kg MCS

Lai Chin-Hsing และคณะ (2002) ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียม และกรดฮิวมิก บนทรายเคลือบเกอร์ไทต์ ทำการทดลอง โดยให้ความร้อนขณะเคลือบผลิตภัณฑ์ไฮโดรไทต์ บนทราย เพื่อเป็นวัสดุดูดซับ ลักษณะการดูดซับแสดงผลให้เห็นว่า จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และมีความพรุนมากกว่าที่ไม่ได้เคลือบการดูดซับของแคดเมียมและกรดฮิวมิกสูงขึ้นอยู่กับ pH แคดเมียม จะถูกดูดซับมากขึ้นเมื่อ pH มาก แต่การดูดซับกรดฮิวมิกจะลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ผลของกรด ฮิวมิกแสดงให้เห็นว่า การดูดซับแคดเมียมอยู่ในช่วงพีเอชที่จำเพาะ

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับแคดเมียม

พรรณราย รุญเจริญ (2546) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถของเพอร์ไลต์ในการกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยกระบวนการดูดซับ ผลการศึกษาปรากฏว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเกิดได้ดีที่พีเอช 6 เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับของเพอร์ไลต์ดิบที่มีอนุภาคขนาด 0.2 – 0.6 มม. 0.6 – 1.0 มม. และ 1.0 – 1.4 มม.เท่ากับ 4.5 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนเพอร์ไลต์เผาทุกขนาดจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 5 ชั่วโมง ผล

การศึกษาความสามารถของเพอร์ไลต์ทั้งสองชนิดโดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิค พบว่าสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของเพอร์ไลต์ดิบได้ ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมที่สภาวะเดียวกัน พบว่าเพอร์ไลต์ดิบมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าเพอร์ไลต์เผา ดังนั้นจึงเลือกใช้เพอร์ไลต์ดิบในการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ดูดซับ ผลปรากฏว่าเพอร์ไลต์ดิบที่มีอนุภาคขนาด 0.2 – 0.6 มม. และความสูงของชั้นเพอร์ไลต์ 80 เซนติเมตร มีเวลาการใช้งานและปริมาตรน้ำที่บำบัดได้มากที่สุด

ไชยวัฒน์ รงศ์สยามานนท์ (2548) ได้ศึกษาการปรับปรุงเม็ดซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยลึกไนท์ ผลการศึกษาพบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยพูนที่ใส่ลงในส่วนผสม สมดุลการดูดติดสามารถอธิบายได้โดยไอโซเทอมการดูดติดแบบแลงเมียร์ และมีค่าความสามารถในการดูดติดสูงสุดเท่ากับ 3.14 มก./ก. ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารดูดซับอื่นๆ และเมื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดแคดเมียมแบบต่อเนื่องทั้งแบบคอลัมน์เดี่ยวและอนุกรม ทำการศึกษาผลของอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ โดยที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 3.75 และ 5.63 ลบ.ม./(ตร.ม.-ชม.) ความเข้มข้นน้ำเข้า 6.6 มก./ล. จะมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมเท่ากับ 0.27 และ 0.22 มก./ก. ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ต่ำจะให้ค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมสูงเนื่องจากเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับสารดูดซับมีระยะเวลาานานกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental search) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย (Solid waste laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนการดำเนินงานดังนี้

3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยมี 10 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 2) การศึกษาองค์ประกอบของตัวดูดซับ
- 3) การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลและประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์
- 4) การศึกษาการดูดซับแคดเมียมไอออนที่ค่าพีเอชในช่วง 5-10
- 5) การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน
- 6) การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของแคดเมียมไอออน
- 7) การศึกษาการคายไอออนแคดเมียมออกจากตัวดูดซับที่ผลิตได้จากน้ำกลั่น และสารละลายกรดอ่อน
- 8) การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน ในถังคอลัมน์โดยใช้ตัวดูดซับทั้งสองชนิด
- 9) การศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับทั้งสองชนิด หลังทำการดูดซับแคดเมียมไอออนแล้ว
- 10) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.2 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวดูดซับ

- 1) ตู้อบความร้อน (Oven) : WTB Binder. Germany
- 2) ภาชนะอลูมิเนียม (รูปในภาคผนวก ข)
- 3) โถป้องกันความชื้นความชื้น (Dessicator)
- 4) ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 35 (0.5 มิลลิเมตร) และเบอร์ 30 (0.6 มิลลิเมตร)

3.2.3 อุปกรณ์สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง : AND HM-300 Japan
- 2) เครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วรอบได้ (Shaker) : ยี่ห้อ K รุ่น VRN-360 (รูปในภาคผนวก ข)
- 3) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) pH 211 Microprocessor pH meter
- 4) กระดาษกรอง Whatman no.5
- 5) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.2.3 อุปกรณ์ที่วิเคราะห์ตัวดูดซับที่ผลิตได้ และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

- 1) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400
- 2) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer บริษัท Perkin-Elmer รุ่น 1760X
- 3) เครื่อง X-Ray Fluorescence บริษัท Philips รุ่น PW 2400
- 4) เครื่อง Specific Area Analyzer Micromeritics Instrument coporation ASAP
2000 v.3.03
- 5) เครื่อง Atomic Absorbtion Spectrophotometer, AAS : Perkin Elmer Instrument, Analyst
300 Atomic Adsorption Spectrophotometer. USA.
- 6) เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer : Perkin Elmer
model PLASMA-1000

3.2.4 อุปกรณ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (column test)

- 1) ท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.80 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร

- 2) สายยางใส วาล์ว และข้อต่อสายยาง
- 3) ถังเก็บน้ำขนาด 10, 20 และ 60 ลิตร
- 4) บั๊มน้ำชนิด Submersible Pump ของ บริษัท JUN รุ่น HX-4500 ขนาด 70 W
(รูปในภาคผนวก ข)
- 5) โครงเหล็กเพื่อยึดแนวท่อ
- 6) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (รูปในภาคผนวก ข)

3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ทฤษฎีธรรมชาติ
- 2) ทฤษฎีจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด
- 3) น้ำกลั่น
- 4) สารละลายเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
- 5) สารละลายแคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- 6) สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)
- 7) สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- 8) สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)
- 9) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 10) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.3 การเตรียมตัวกลางดูดซับ

การเตรียมตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (modified Adsorption Method)

(Benjamin และคณะ, 1996 และ Szecsody และคณะ, 1994 อ้างถึงใน เบญจวรรณ, 2547)

- 1) คัดทรายให้มีขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 และ 35 (0.5-0.6 มม.)
- 2) แช่เม็ดทรายด้วยกรดซัลฟิวริก 50 % (pH=1) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) ล้างออกด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 120 นาที

- 4) ใช้ทรายที่อบแห้งแล้ว 200 กรัมผสมกับสารละลาย ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) (ปรับพีเอชให้เป็น 12 ด้วย NaOH 4 M) ซึ่งทำโดยนำ ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) 20 กรัมละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง
- 5) นำทรายเคลือบมาล้างออกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างใส
- 6) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 120 นาที



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายแคดเมียมมาตรฐานเข้มข้น 1,000 มก./ล. จาก $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ โดยชั่งมา 2.7437 กรัมละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ก็จะได้สารละลายแคดเมียม 1,000 มก./ล.
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียม (II) 3 7 และ 10 มก./ล. โดยใช้สารละลายแคดเมียมมาตรฐานจำนวน 3 7 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

3.5 การดำเนินการทดลอง

ในการวิจัยแบ่งการทดลองเป็น 6 ขั้นตอน

3.5.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของทรายธรรมชาติเหล็กออกไซด์และทรายจากเตาฟลูอิดไธซ์ เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ดังตารางที่ 3.1

1. คุณสมบัติทางกายภาพ

- 1) วิเคราะห์ถ่ายภาพขยาย 4500 เท่า ของพื้นที่ผิวเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง Scan Electron Microscop (SEM)
- 2) วิเคราะห์พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ Gas Sorption Analyzer โดยวิธี BET

2. องค์ประกอบทางเคมี

- 1) วิเคราะห์ปริมาณของออกไซด์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer (XRF)
- 2) วิเคราะห์รูปของเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer

ตารางที่ 3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีกับวิธีวิเคราะห์

หัวข้อที่ศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1.ทางกายภาพ <ul style="list-style-type: none"> ● พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ ● โครงสร้างรูพรุน 	Gas Sorption Analyzer โดยวิธี BET SEM
2.ทางเคมี <ul style="list-style-type: none"> ● ปริมาณธาตุ ● รูปของสารประกอบ 	X-ray Fluorescence (XRF) Fourier Transform Infrared Spectrometer

3.5.2 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดผิวของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

3.5.2.1 การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมไอออนของตัวดูดซับ

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 9
- 2) ชั่งทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิดที่มีขนาดอนุภาค 0.5-0.6 มิลลิตร 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิตร จำนวน 8 ใบ
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิตร เติม HNO_3 ให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณแคดเมียมไอออนที่เหลือ โดยเครื่อง AAS

- 7) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน

3.5.2.2 การศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมไอออนของตัวดูดซับ

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้มีค่า 5, 6, 7, 8, 9, 10 และไม่ปรับพีเอช ด้วย HNO_3 และ NaOH
- 2) ชั่งทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิด ที่มีขนาดอนุภาค 0.5-0.6 มิลลิเมตร 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิเมตร จำนวน 7 ใบ
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิเมตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิตร เติม HNO_3 ให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณแคดเมียมไอออนที่เหลือ โดยเครื่อง AAS
- 7) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช กับประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน

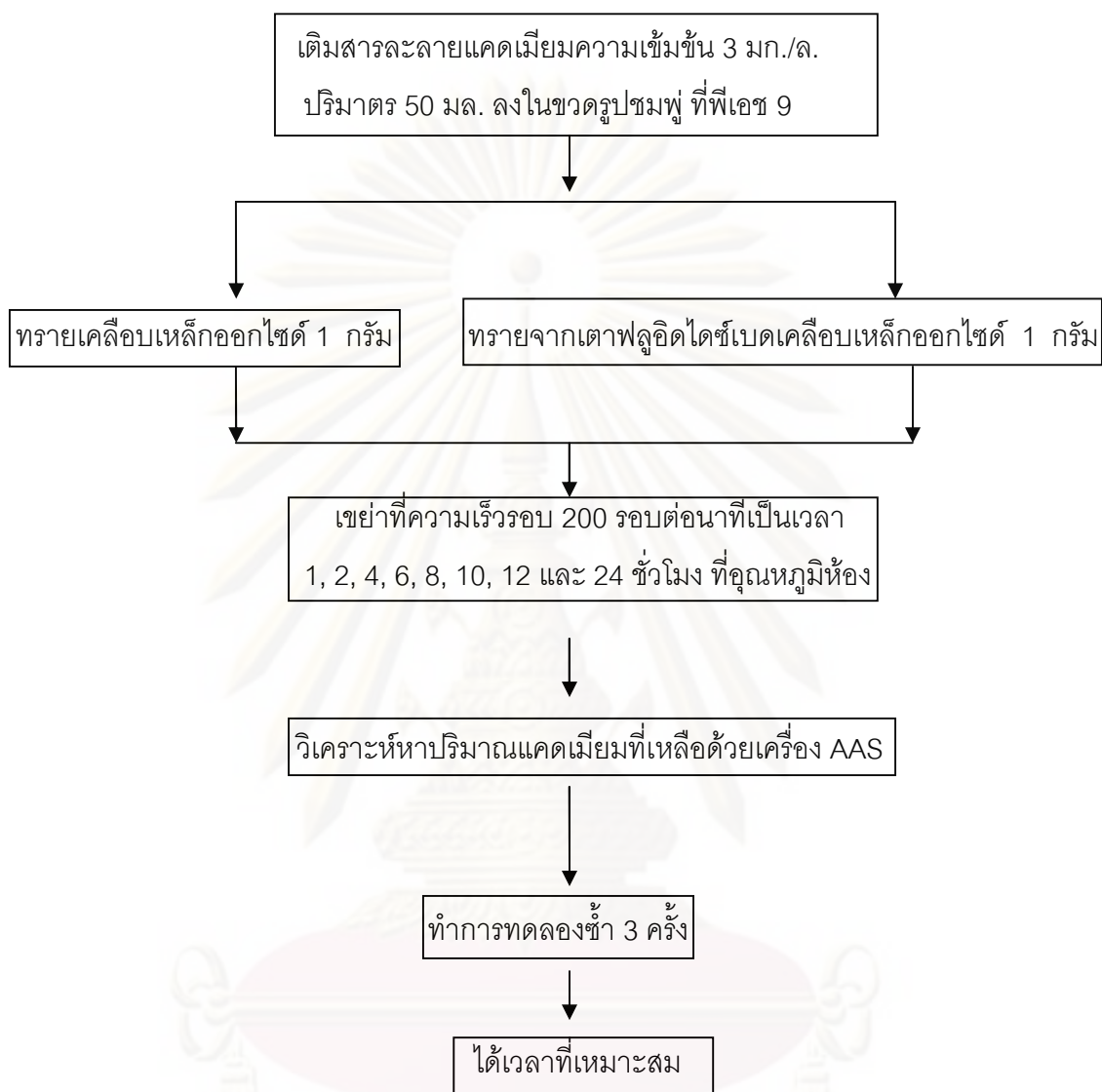
3.5.2.3 การศึกษาเพื่อหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมไอออน

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน 3, 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชเป็นกลาง
- 2) ชั่งทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิด ที่มีขนาดอนุภาค 0.5-0.6 มิลลิเมตร 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิเมตร 6 ใบ
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที่เป็นเวลาที่เหมาะสมตามข้อ 3.5.2.1 ที่อุณหภูมิห้อง

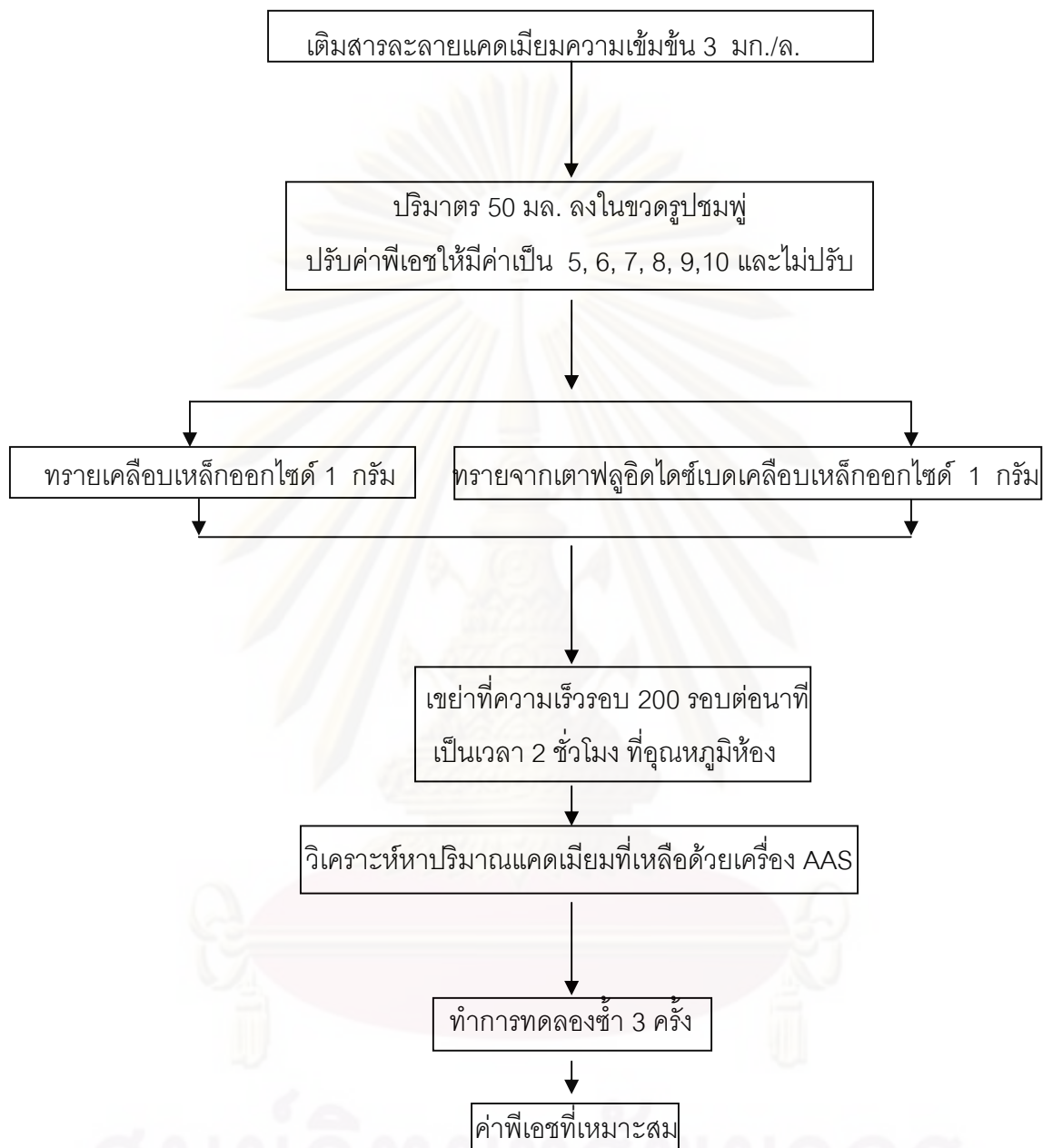
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 ใช้น้ำในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร เติม HNO_3 ให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณแคดเมียมไอออนที่เหลือ โดยเครื่อง AAS
- 7) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม กับประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน

3.5.3 การศึกษาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมไอออน

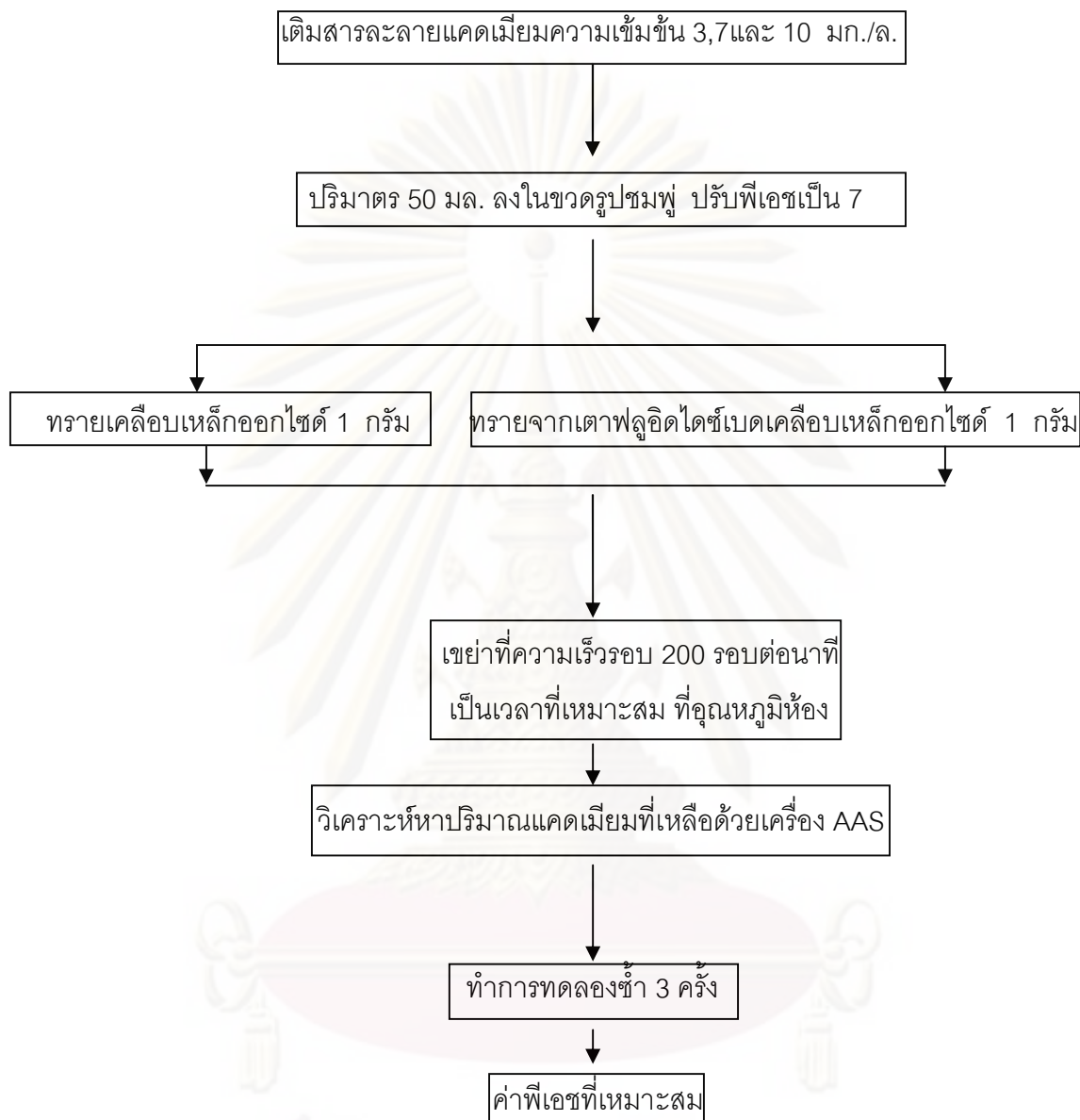
- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียมไอออน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ชั่งทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิด ที่มีขนาดอนุภาค 0.5-0.6 มิลลิลิตร 0.2 0.5 0.7 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ใสในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใสลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมตามข้อ 3.5.2.1 และพีเอชที่เหมาะสมตาม 3.5.2.2 ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 ใช้น้ำในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร เติม HNO_3 ให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณแคดเมียมไอออนที่เหลือ โดยเครื่อง AAS
- 7) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างไอโซเทอมการดูดซับตามรูปแบบของฟรุนดลิช และแลงเมียร์ โดยเลือกสมการที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด



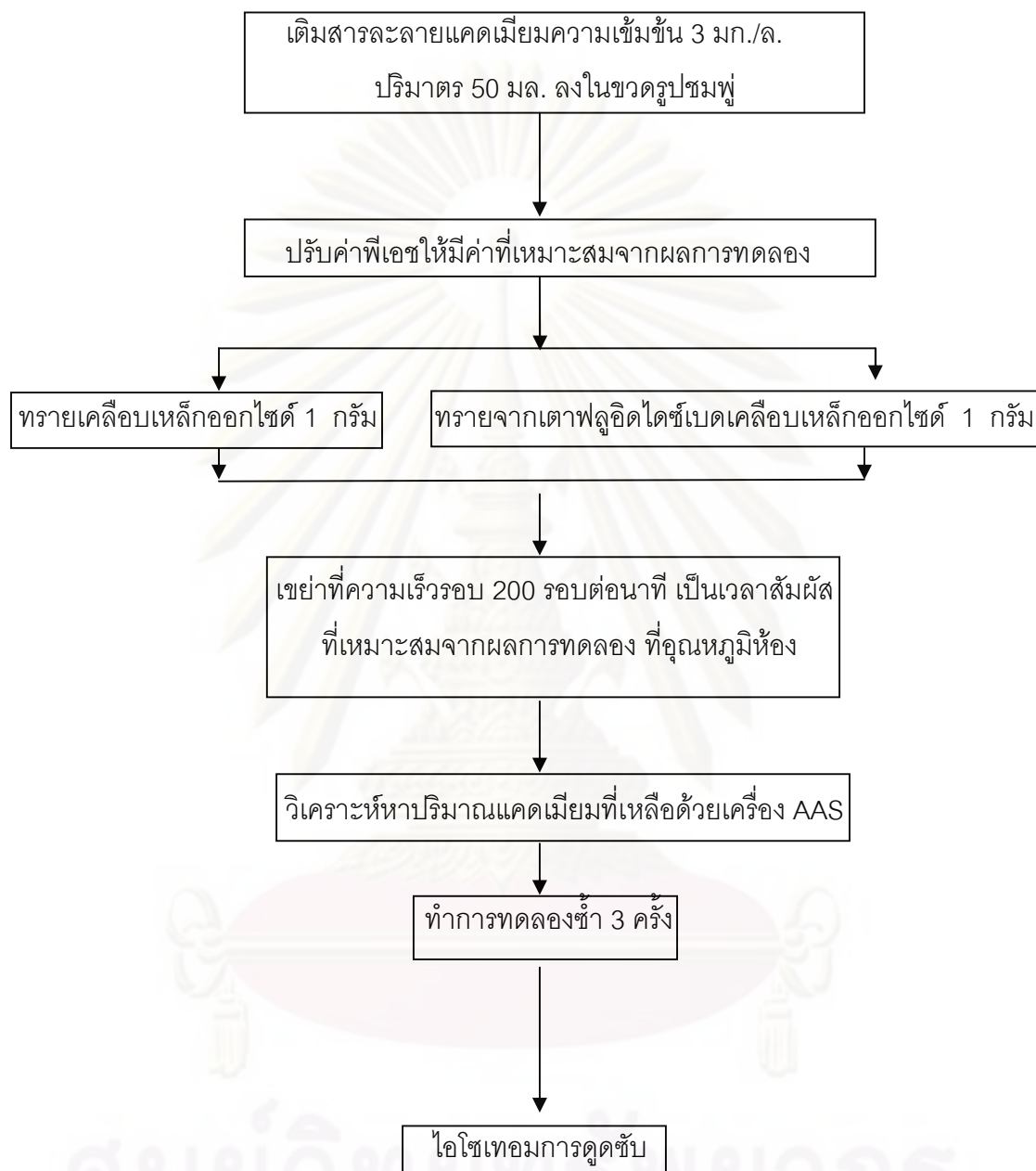
รูปที่ 3.2 การศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 3.3 ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 3.4 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 3.5 การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์โดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดซับ

3.5.4 การศึกษาการคายซับไอออนแคดเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

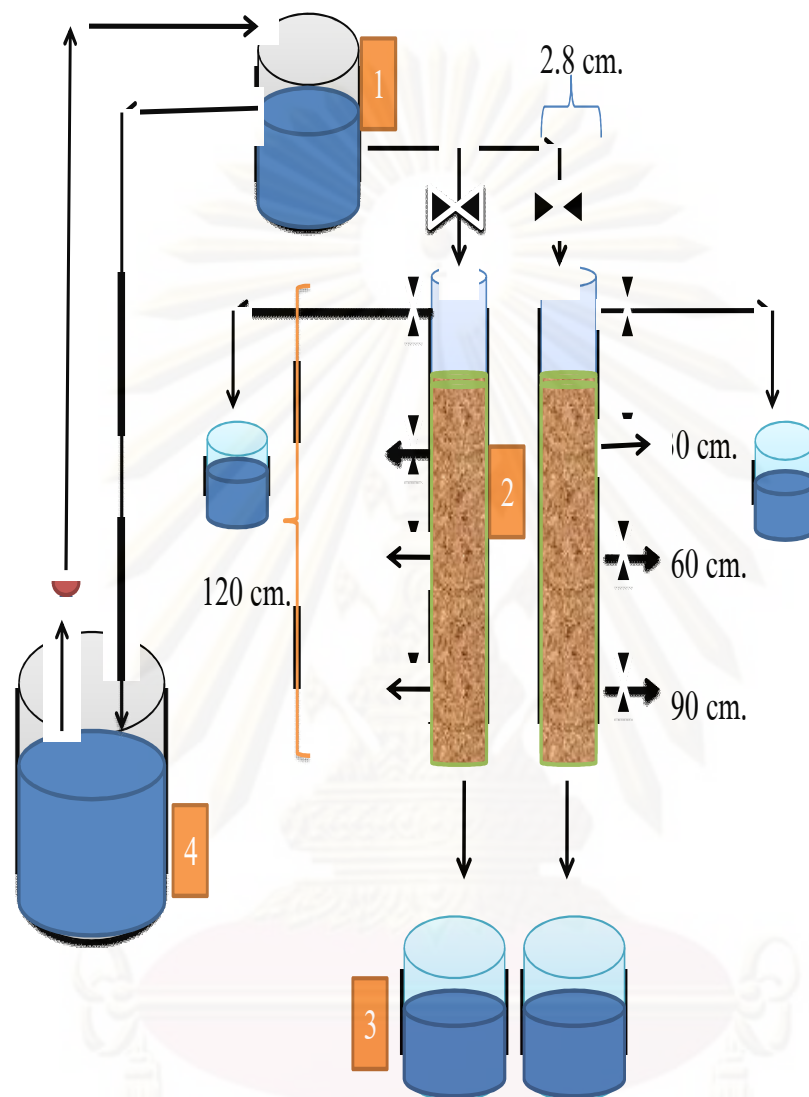
- 1) ชั่งตัวดูดซับจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิด ปริมาณ 1 กรัม เขย่าที่ 200 รอบ ต่อนาที กับสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทำการปรับค่าพีเอชที่เหมาะสม (ผลจากการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมตาม 3.5.2.2) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เป็นเวลาเท่ากับเวลาเข้าสู่สมดุล (ผลจากการหาค่าเวลาที่เหมาะสมตาม 3.5.2.1) ทำทั้งหมด 6 ตัวอย่าง
- 2) นำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เก็บน้ำใสไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ โดย AAS เพื่อหาปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ
- 3) นำกระดาษกรองที่มีตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
- 4) นำตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับและทำให้แห้งแล้ว ปริมาณ 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 3 ใบ
- 5) เติมสารละลายกรดอะซิติก 2% 5% และน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดแต่ละใบ
- 6) เขย่าบนเครื่องเขย่าที่อัตราเขย่า 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 7) นำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เก็บน้ำใสไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจหาปริมาณแคดเมียมที่ถูกคายออกมา โดย AAS

3.5.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโดยคอลัมน์ดูดซับ (Adsorption Column)

- 1) เตรียมคอลัมน์บรรจุตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ คอลัมน์ทำจากพลาสติกใสเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5
- 2) บรรจุตัวกลางใหม่ความสูงของชั้นตัวกลาง 90 เซนติเมตร
- 3) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นแคดเมียมที่เหมาะสม
- 4) เติมน้ำเสียแบบต่อเนื่องโดยควบคุมอัตราการไหลที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลลง (down flow) โดยใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังพักน้ำเสีย ซึ่งมีทางน้ำล้นสำหรับควบคุมระดับน้ำให้คงที่
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมงของน้ำที่บำบัดผ่านระบบจากทางน้ำออกที่ตำแหน่ง 30,60 และ 90 เซนติเมตรของความสูงชั้นตัวกลาง แต่จะเก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิลิตร โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ จนกระทั่งความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ โดย AAS
- 7) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ Breakthrough curve ของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย

3.5.6 การศึกษาผลการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยสารละลายกรดอะซิติกต่อความสามารถในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

- 1) เตรียมคอลัมน์บรรจุตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายจากเตาฟลูอิไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ คอลัมน์ทำจากพลาสติกใส เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร
- 2) บรรจุตัวกลางใหม่มีความสูงของชั้นตัวกลาง 90 เซนติเมตร
- 3) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นแคดเมียม 3 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4) เติมน้ำเสียแบบต่อเนื่องโดยควบคุมอัตราการไหลที่ 25 มิลลิตรต่อนาที ให้ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลลง (down flow) โดยใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังพักน้ำเสีย ซึ่งมีทางน้ำล้นสำหรับควบคุมระดับน้ำให้คงที่ จนกระทั่งความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า
- 5) ทำการฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายที่เหมาะสมตามการทดลองการคายซับ โดยผ่านสารละลายฟื้นฟูเป็นเวลา 30 นาที
- 6) ทำการล้างคอลัมน์หลังจากฟื้นฟูด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำออกมีพีเอชเป็นกลาง
- 7) จึงทำการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตรรอบต่อไปและเก็บตัวอย่างที่ความสูง 90 เซนติเมตร จนกระทั่งความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า
- 8) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ โดย AAS
- 9) เริ่มรอบการทำงานใหม่ตั้งแต่ข้อ 3-8 ทั้งหมด 5 รอบการทำงาน



รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของคอลัมน์ดูดซับ

1. ถังพักน้ำเสีย, ถังน้ำรีเจนเนอเรนต์

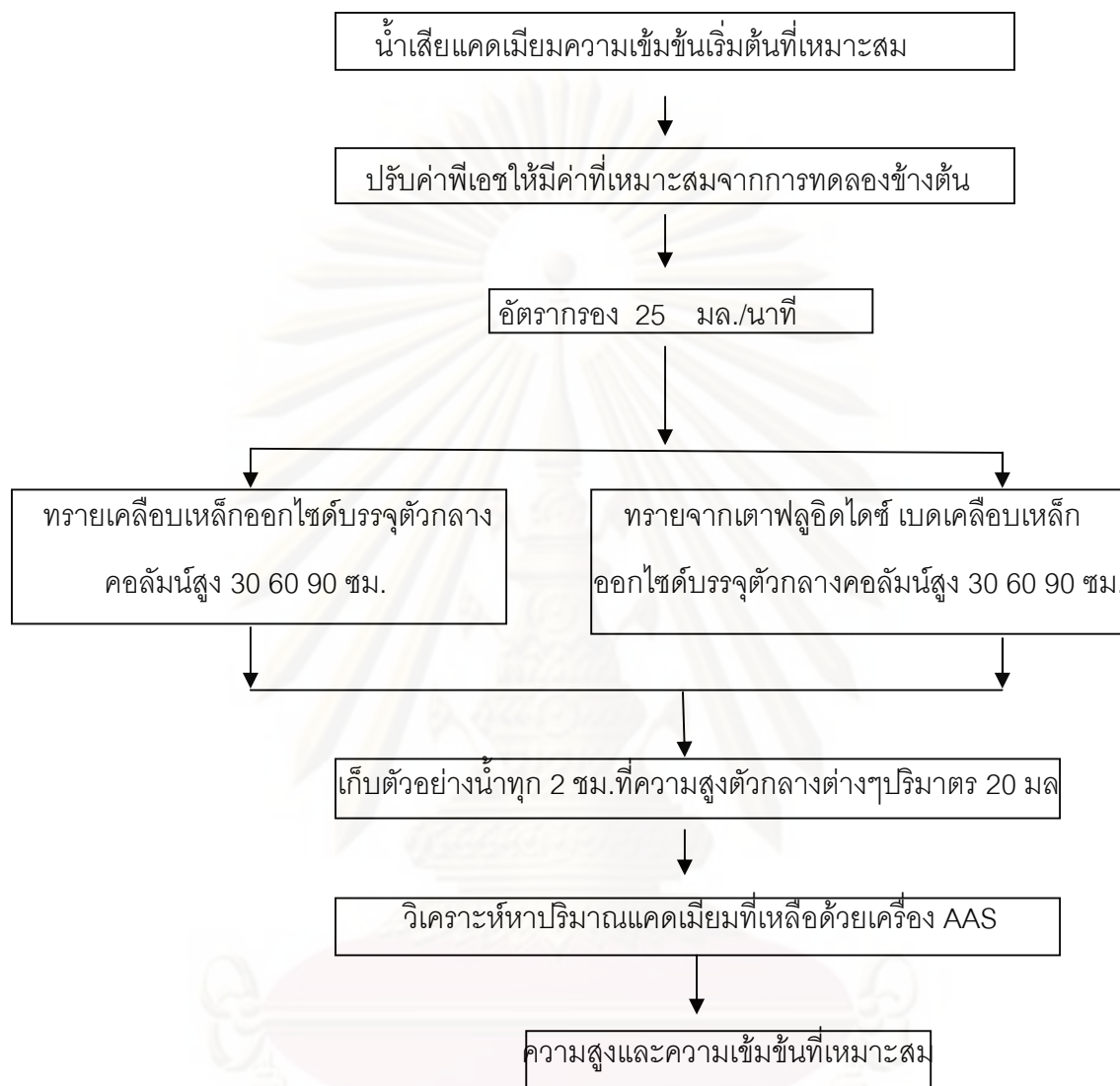
2. คอลัมน์บรรจุตัวกลาง

3. ถังน้ำที่ผ่านการดูดซับ

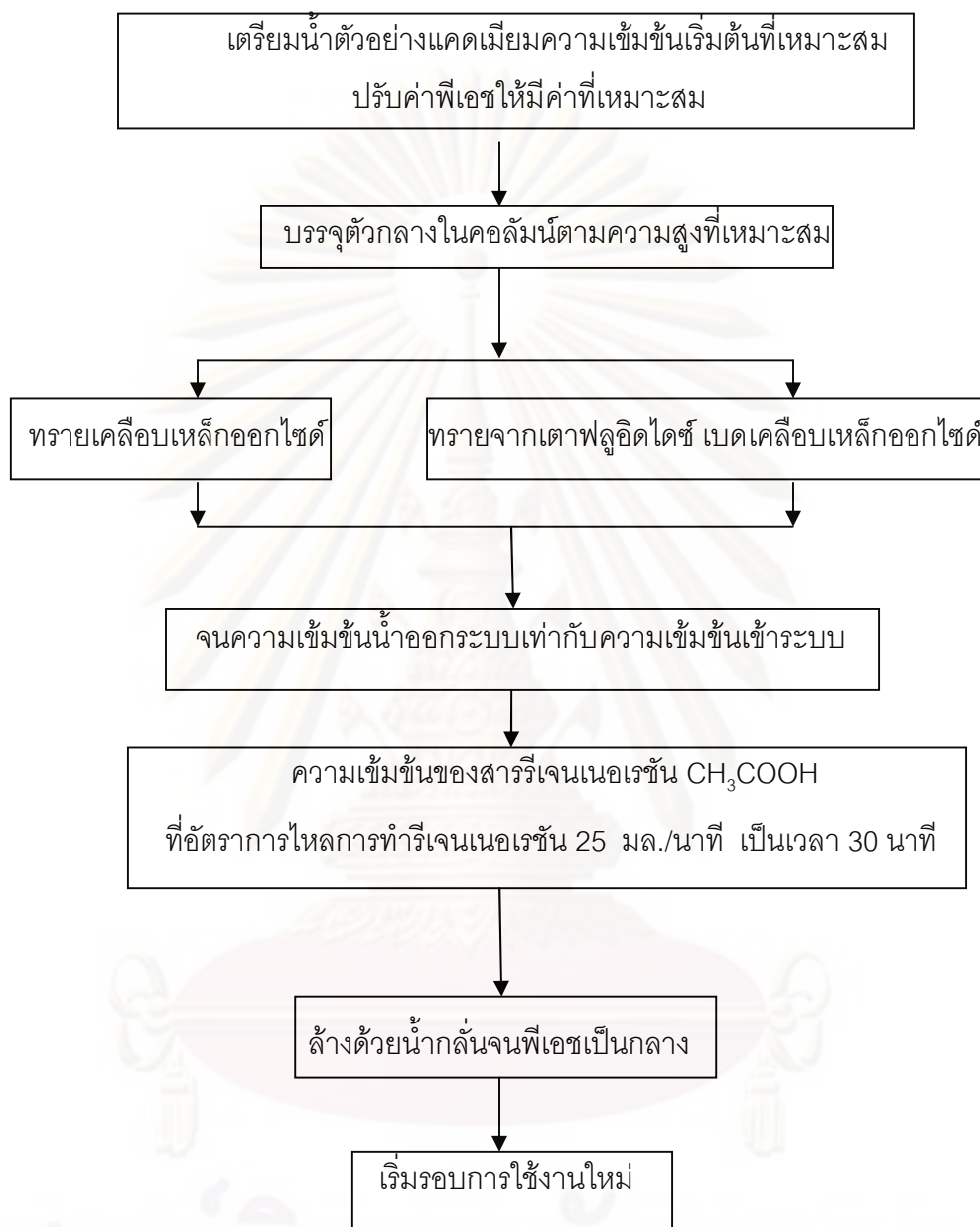
4. ถังน้ำเสีย

5. ประตูน้ำ

6. เครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 3.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ที่ความสูงต่างๆ



รูปที่ 3.8 ศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อการนำกลับมาใช้งานใหม่

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการใช้สารดูดซับที่ผลิตขึ้นจากการใช้ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นเศษที่เหลือทิ้งจากกระบวนการหมักต้มข้าวเพื่อผลิตไอน้ำของโรงงานสิ่งทอนำมาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในการกำจัดแคดเมียมด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยทำการใช้วัสดุดูดซับด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 3 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมของวัสดุดูดซับที่เหมาะสม การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิว และการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังดูดซับแบบคอลัมน์ (Adsorption Column)

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองกับวัสดุดูดซับ 2 แบบ คือ

1. วัสดุดูดซับจาก ทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์
2. วัสดุดูดซับจาก ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับ

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตวัสดุดูดซับ คือ ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดจาก บริษัทไทยโทเรกไทยมิลล์ จำกัด อ.นครชัยศรี จ.นครปฐมและทรายธรรมชาติจากทรายแม่น้ำ นำทรายทั้งสองชนิดมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 35 (0.5 มิลลิเมตร) และเบอร์ 30 (0.6 มิลลิเมตร) เอาที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 35 ซึ่งมีค่า effective size 0.5-0.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของทรายขนาดกลางสำหรับการกรองเร็ว ส่วนค่าความพรุนมีค่าอยู่ที่ 0.7 ซึ่งมีค่าค่อนข้างมากกว่าทรายธรรมชาติทั่วไปอาจเนื่องจากมีปริมาตรโพรงสูงกว่าทรายทั่วไป แล้วนำทรายทั้งสองชนิดไปแช่กรด กำมะถัน 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วัสดุดูดซับ ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด

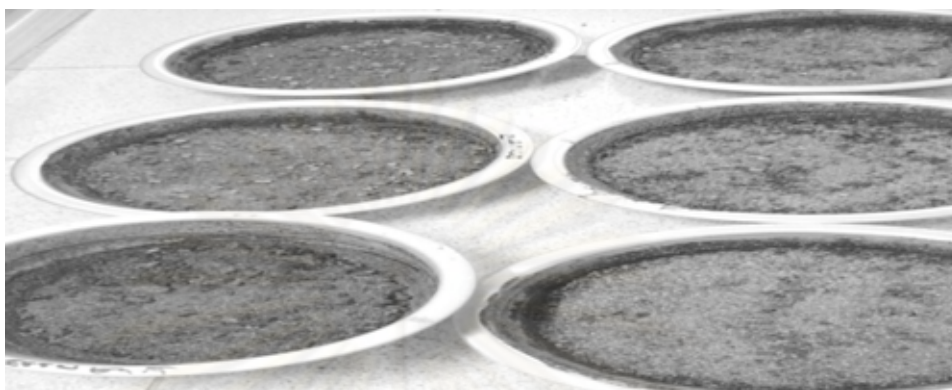


รูปที่ 4.2 วัสดุดูดซับ ทราจธรรมชาติ

ลักษณะทั่วไปของวัสดุดูดซับหลังจากที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นทำให้ได้ทรายที่สะอาด โดยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์จะมีสีเข้มออกน้ำตาลแดงส่วนทรายธรรมชาติจะมีสีเหลืองนวล หลังจากที่ได้ล้างแล้วจะทำการเคลือบทรายด้วยเหล็กออกไซด์ดังรูปที่ 4.3 แล้วจึงนำไปอบด้วย 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมงดังรูปที่ 4.4 หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างใสดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



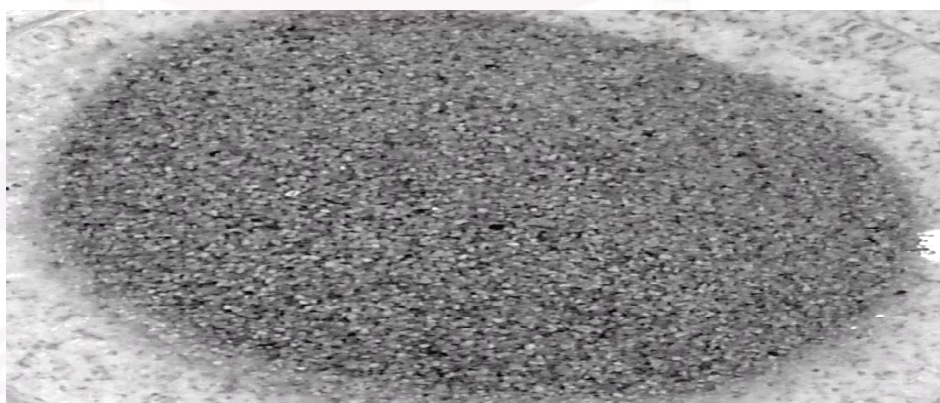
รูปที่ 4.3 การเคลือบด้วยสารละลายเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.4 หลังจากอบทรายที่เคลือบด้วยสารละลายเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.5 ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.6 ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ด้วย BET ตามตารางที่ 4.1 และภาพถ่ายลักษณะพื้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์กำลังขยาย 1,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope,SEM)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

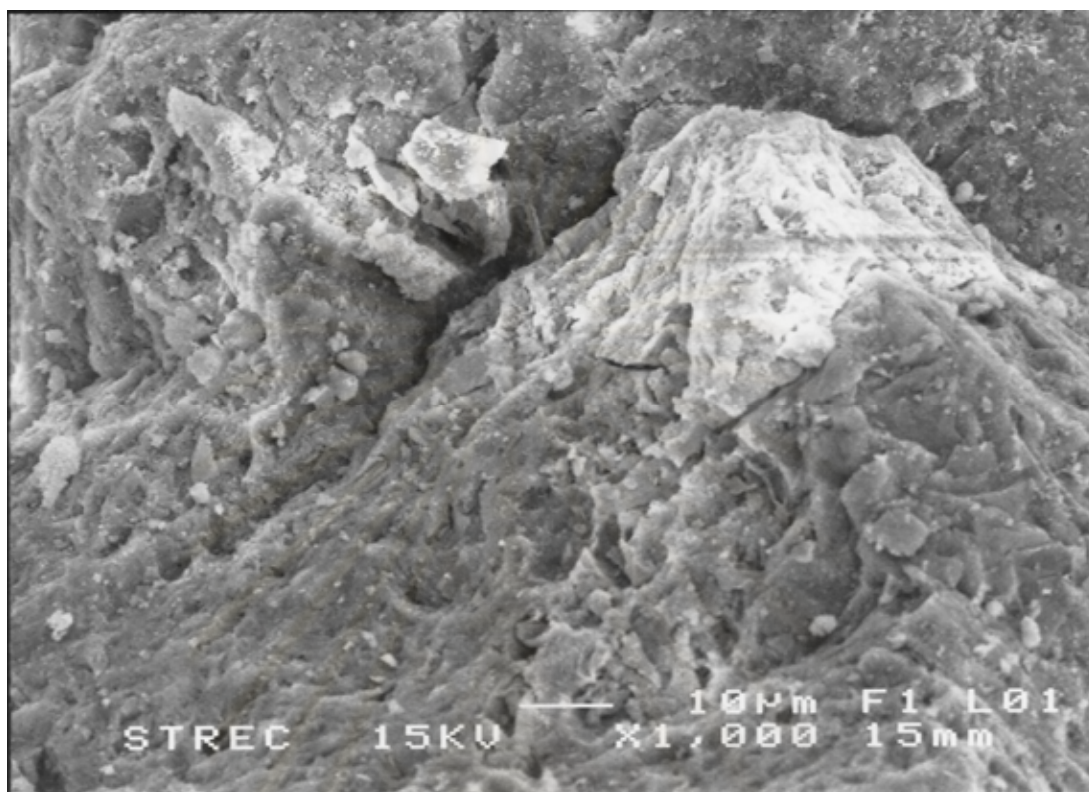
ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพที่ศึกษา		
	ขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม)
ทรายธรรมชาติ	65.87	0.47	0.000002
ทรายจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด	60.45	1.156	0.000362
ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (ก่อนดูดซับ)	63.68	0.77	0.000032
ทรายจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ เหล็กออกไซด์ (ก่อนดูดซับ)	59.39	1.44	0.000275
ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (หลังดูดซับ)	53.05	0.64	0.000198
ทรายจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ เหล็กออกไซด์ (หลังดูดซับ)	59.39	1.35	0.00047

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้งก่อนเคลือบ หลังเคลือบ และหลังดูดซับดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการมีเหล็กออกไซด์สะสมบนตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและทรายจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดมีพื้นที่ผิวมากกว่าทรายธรรมชาติเนื่องจากผ่านกระบวนการเผาที่ความร้อนสูงจึงทำให้พื้นที่ผิวสูงกว่า

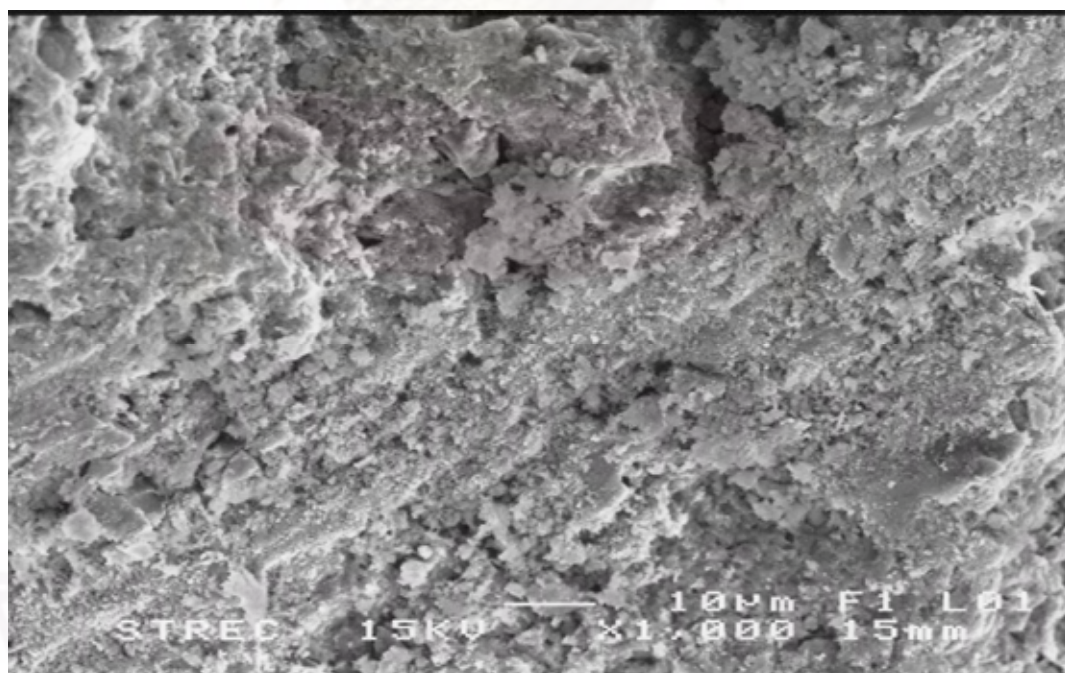
เมื่อนำทรายที่เคลือบแล้วมาผ่านการดูดซับจะมีพื้นที่ผิวลดลงเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากในกระบวนการดูดซับต้องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีดังนั้นก็อาจทำให้เหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวทรายหลุดออกบางส่วนจะเห็นได้จากปริมาตรโพรงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ถ้าทำการเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ผิวที่ได้กับตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งอยู่ในช่วง 400-900 ตร.ม.ต่อกรัม พบว่าพื้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ได้มีค่าน้อยมากอาจจะเนื่องจากลักษณะการเตรียมแตกต่างกันโดยเป็นวัสดุคนละชนิดกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับทรายเคลือบแมงกานีสพบว่ามีค่าพื้นที่ผิวที่มากกว่าเล็กน้อย โดยทรายเคลือบแมงกานีสทางการค้ามีค่าประมาณ 4-5 ตร.ม.ต่อกรัม อาจเพราะว่าขนาดทรายที่ใช้แตกต่างกันโดยทรายที่ทำการทดลองขนาดเล็กกว่าทรายเคลือบแมงกานีสทางการค้า

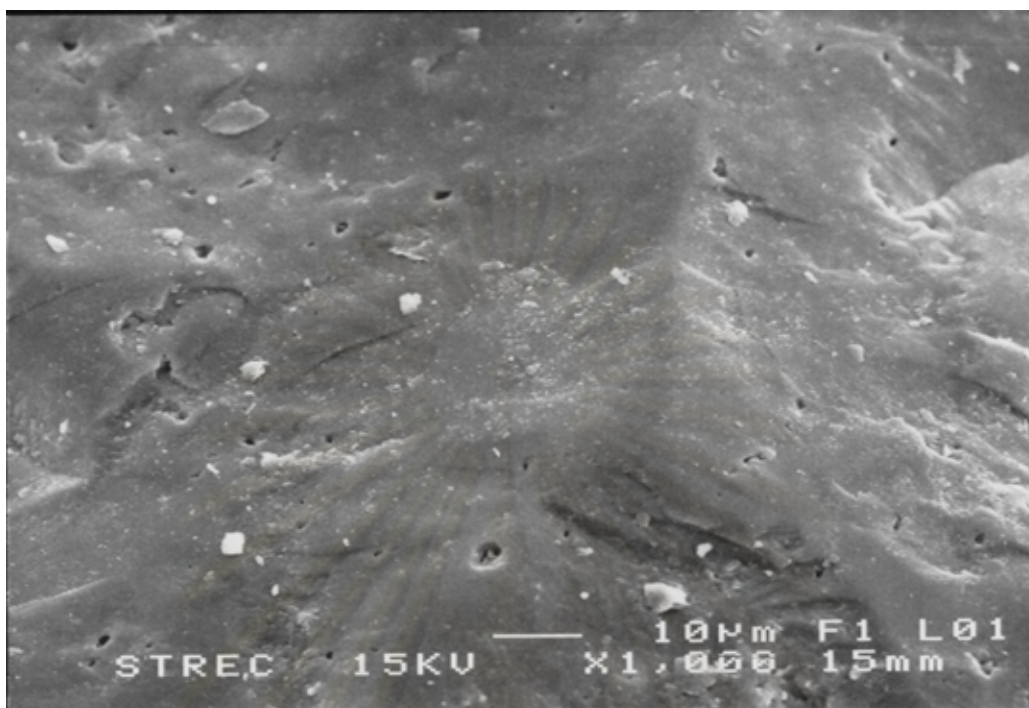
ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า จากการเปรียบเทียบพบว่า ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วรูปที่ 4.7 มีลักษณะเป็นรูพรุนผิวไม่เรียบแตกต่างจากทรายที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งานมาคือมีผิวที่เรียบกว่ารูปที่ 4.9 แล้วถ้านำทรายไปเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์พบว่าลักษณะพื้นผิวจะมีเม็ดเล็กๆหรือเศษชิ้นส่วนกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว ซึ่งน่าจะเป็นเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิว แต่จะต้องไปศึกษาเพิ่มเติมด้วย FTIR ดังแสดงในรูป 4.8 และ 4.10



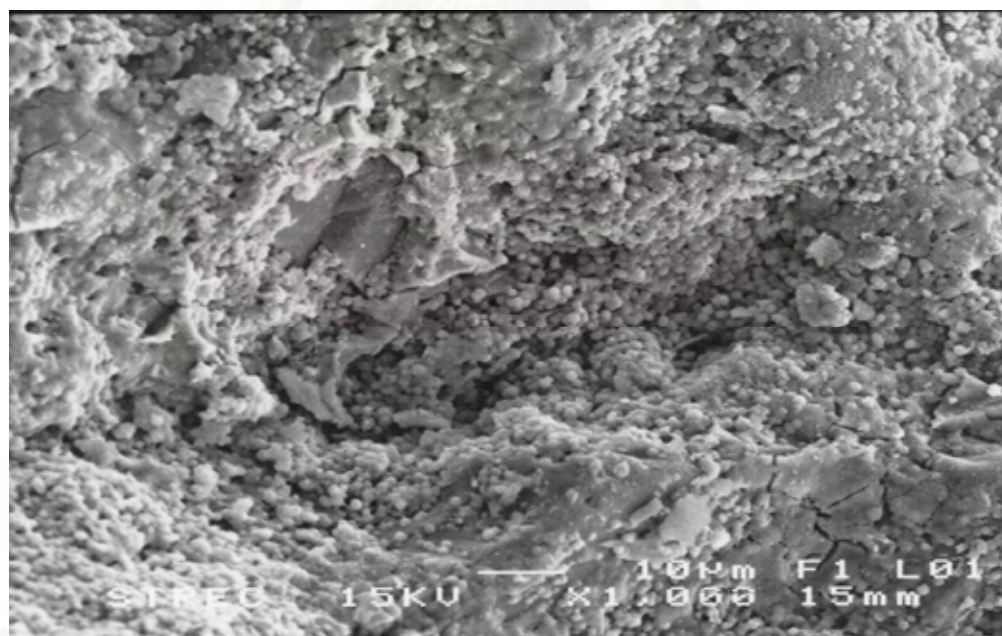
รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนเคลือบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

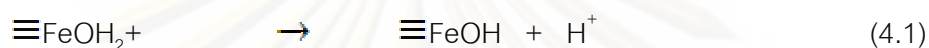


รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของทรายธรรมชาติก่อนเคลือบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดซับ โดยแคดเมียมไอออน (II) ซึ่งเป็นโลหะประจุบวกสอง จะเกิดการยึดติดกับอะตอมออกซิเจนและควบคู่กับการปล่อยโปรตอน (H^+) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการดึงไฮโดรเจนออก เรียกว่า Dehydrogenation โดยสามารถเขียนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ (Surface Complexation Reaction) ในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) (Dzombak และ Moral, 1990)



4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี

4.1.2.1 การวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น PW 2400 ได้ผลดังตารางที่ 4.2 พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ SiO_2 ส่วนสารประกอบออกไซด์อื่นๆ ได้แก่ Al_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O , CaO , TiO_2 , ส่วนปริมาณของเฟอริกออกไซด์ Fe_2O_3 เพิ่มขึ้นหลังจากเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (Lai และคณะ, 2002) ดังนั้น ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติช่วยในการดูดซับและยังมีปริมาณเหล็กที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังจากเคลือบแล้วมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 2.3 เท่าส่วนทรายธรรมชาติหลังจากเคลือบมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 7.8 เท่าอาจจะเนื่องจากว่าทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีปริมาณเหล็กดั้งเดิมมากอยู่แล้วทำให้จำนวนเท่าที่เพิ่มขึ้นไม่มากเท่ากับทรายธรรมชาติ น่าจะเป็นไปได้ที่สารประกอบเหล็กมีสมบัติในการดูดซับประจุบวกได้ ดังนั้นจึงน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการช่วยดูดซับสามารถลดปริมาณแคดเมียมไอออน (II) ในรูปสารละลายได้

เมื่อสังเกตปริมาณของธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 จากตารางจะพบว่า ปริมาณของ SiO_2 ลดลงเล็กน้อยหลังจากการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ อาจจะเป็นเนื่องมาจากในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับจะต้องเตรียมโดยการให้ความร้อน และต้องล้างด้วยกรดแก่ ดังนั้นอาจจะทำให้บางส่วนของตัว SiO_2 เกิดการแตกหักของผลึกหรือถูกทำลายออกไปบางส่วน ส่วน Al_2O_3 จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องจากการเตรียมตัวดูดซับเช่นกันที่มีการล้างตัวดูดซับด้วยกรดแก่อาจล้างเอาพวกแอนไอออนอื่นๆ ที่ติดอยู่กับ Al_2O_3 เมื่อล้างเอาออกไปแล้วทำให้ Al_2O_3 ปรากฏชัดขึ้นมามากกว่าตอนที่ก่อนมีการเคลือบ

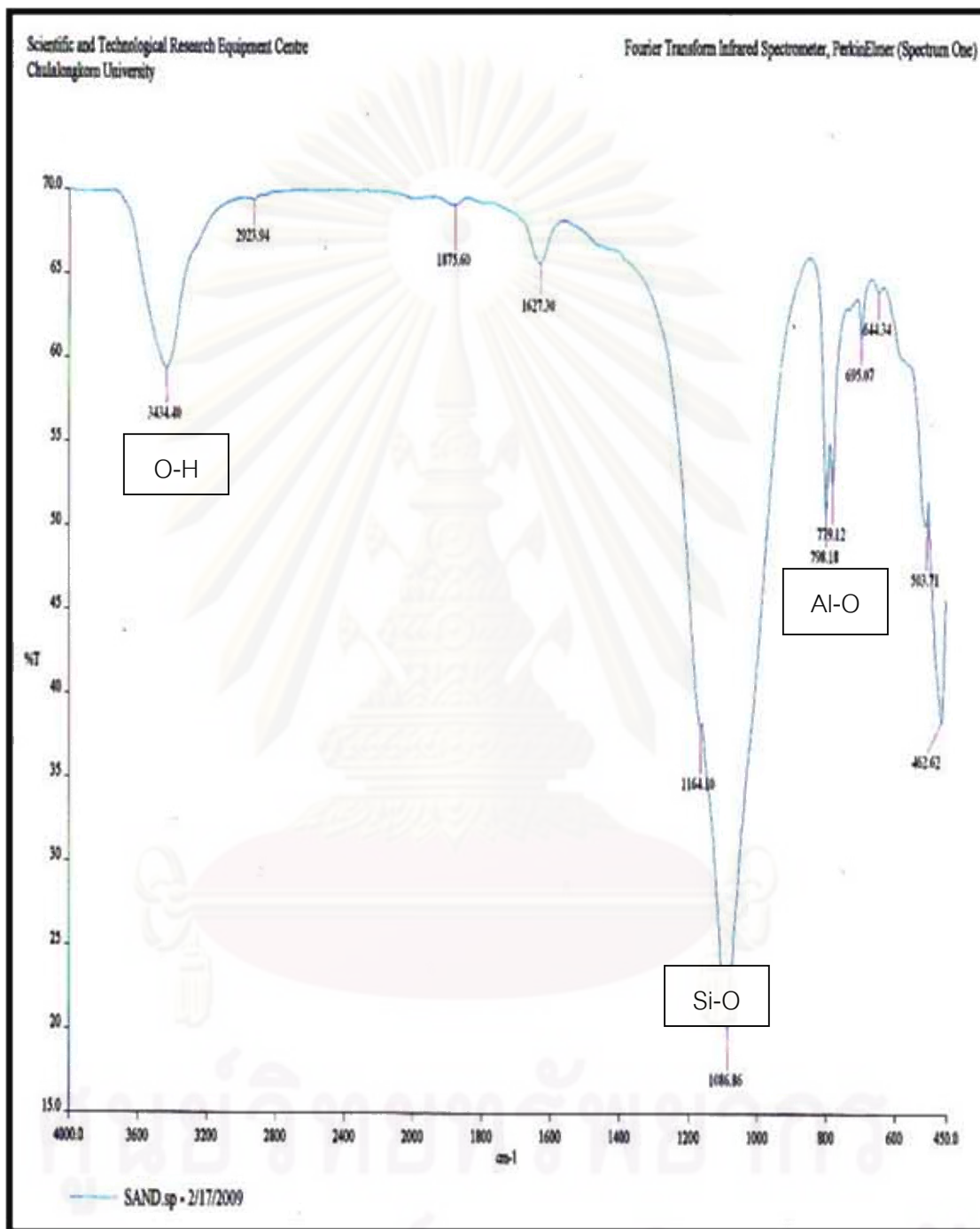
ตารางที่ 4.2 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับ ที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

สารประกอบ	ก่อนเคลือบ		หลังเคลือบ	
	ทรายจากเตา ฟลูอิดไคซ์เบด	ทรายธรรมชาติ	ทรายจากเตา ฟลูอิดไคซ์เบด	ทราย ธรรมชาติ
	ความเข้มข้น (%)	ความเข้มข้น (%)	ความเข้มข้น (%)	ความเข้มข้น (%)
SiO_2	88.59	85.24	81.39	83.29
Al_2O_3	3.48	3.41	4.39	5.44
Fe_2O_3	2.40	0.41	5.62	3.19
K_2O	2.22	3.25	2.55	5.21
MgO	0.48	0.62	0.29	0.14

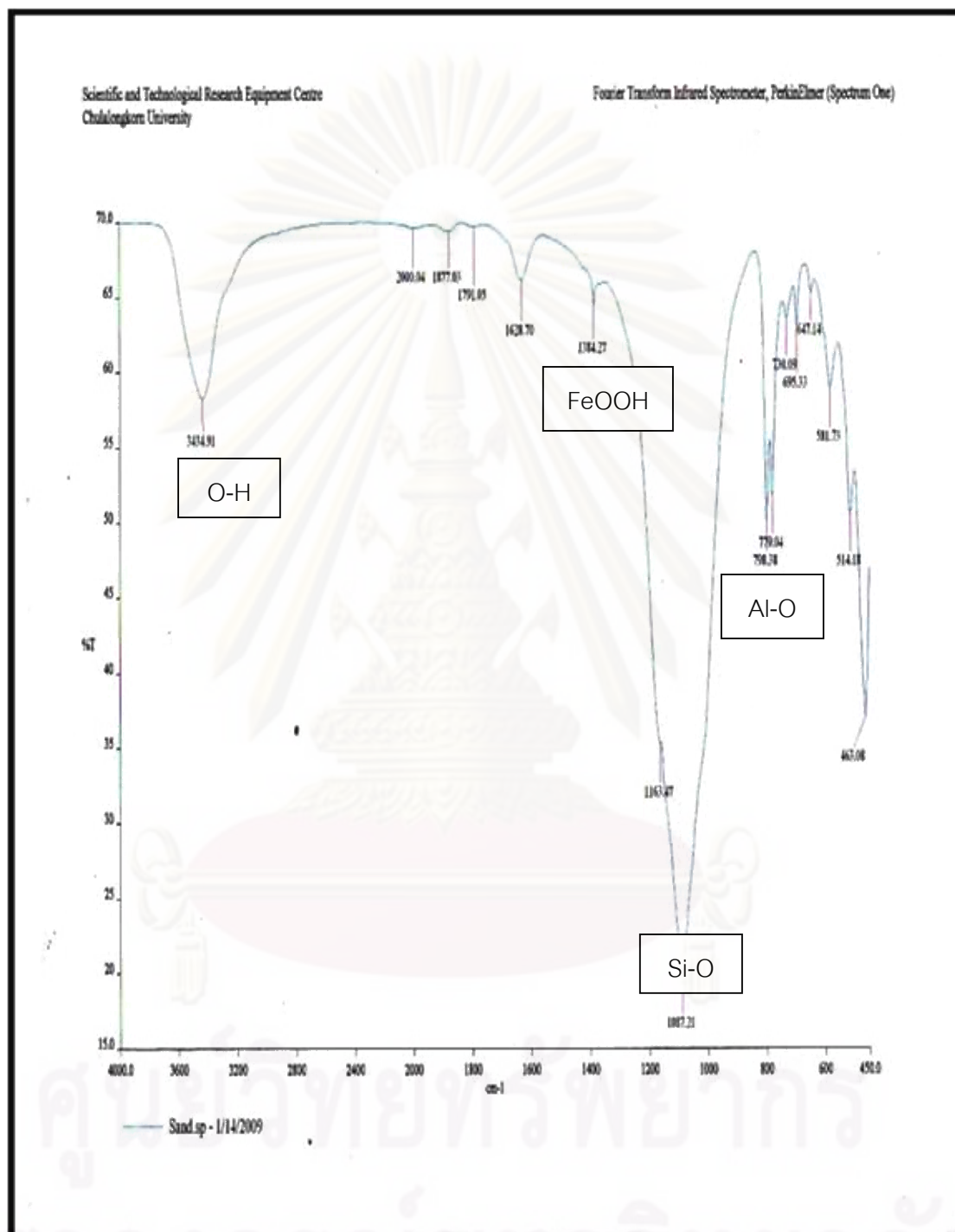
Na ₂ O	0.69	1.10	1.55	0.67
CaO	1.44	0.18	0.32	0.21
TiO ₂	0.10	0.09	0.13	0.15

4.1.2.2 การวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

จากเส้นกราฟของตัวดูดซับก่อนที่จะทำการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ซึ่งมีลักษณะมีจุดยอด (Peak) ของกราฟแต่ละกราฟทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) ได้ วิเคราะห์ได้ว่าพบหมู่ฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) ของทรายทั้งก่อนเคลือบจะแสดงแถบ 1086.86, 798.18 และ 462.62 cm⁻¹ และหลังเคลือบ 1087.21, 798.38 และ 463.08 cm⁻¹ ซึ่งเป็นลักษณะของ ซิลิกา และ อมิโนซิลิเกต ส่วนลักษณะแถบของทรายหลังเคลือบที่แสดงแถบเพิ่มขึ้นมาคือ 1384.27 cm⁻¹ ซึ่งถือว่าเป็น เกอร์ไทต์ FeOOH เหล็กที่สะสมบนตัวดูดซับ คือ ออกซีไฮดรอกไซด์ oxyhydroxide สอดคล้องกับการศึกษาของ (Boujelben และคณะ, 2008) ได้ทำการวิเคราะห์ Infrared spectroscopy ของตัวดูดซับ ซึ่งแสดงแถบที่ 1382 และ 1382.94 cm⁻¹ ซึ่งถือว่าเป็น เกอร์ไทต์ FeOOH และการศึกษาของ (Boily และคณะ, 2004) ทำการศึกษาโครงสร้างรูปเชิงซ้อนของแคดเมียมที่พื้นผิวระหว่างน้ำกับเกอร์ไทต์ โดยผลของ IR- spectroscopy จะพบแถบของเกอร์ไทต์ที่ ~1400 cm⁻¹ จึงเป็นการช่วยยืนยันได้ว่าการเตรียมตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นการเคลือบบนผิวทรายที่อยู่ในรูปเกอร์ไทต์



รูปที่ 4.11 ค่า A (Absorbance) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ด้วย FTIR ของตัวดูดซับก่อนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.12 ค่า A (Absorbance) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ด้วย FTIR ของตัวดูดซับหลังเคลือบด้วยเหล็ก

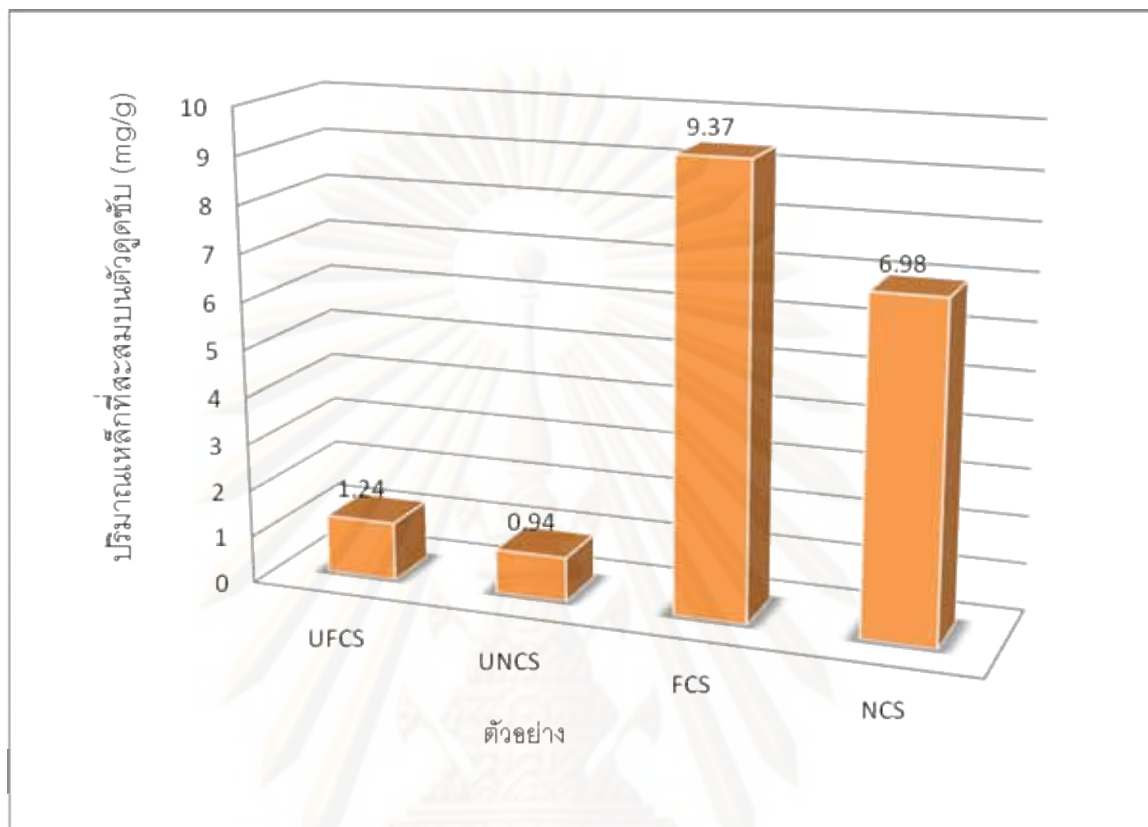
ออกไซด์

4.1.2.3 วิเคราะห์ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่สะสมบนตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กทั้งหมดที่สะสมบนตัวดูดซับโดยการย่อยตัวอย่างตามภาคผนวก ก แล้วนำไปหาปริมาณเหล็กทั้งหมดด้วย Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) ได้ผลดังตารางที่ 4.3 ทราบจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนเคลือบจะมีปริมาณเหล็กทั้งหมดที่สะสม 1.24 mg/g หลังจากทำการเคลือบเหล็กออกไซด์ ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่สะสมบนตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 9.37 mg/g ซึ่งเมื่อเทียบเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.13 จะมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น 7.56 เท่า ส่วนทรายธรรมชาติก่อนเคลือบจะมีปริมาณเหล็กทั้งหมดสะสม 0.94 mg/g หลังจากทำการเคลือบเหล็กออกไซด์ ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่สะสมบนตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 6.98 mg/g สัดส่วนที่เพิ่มขึ้น 7.42 เท่า เมื่อดูปริมาณการสะสมจะเห็นได้ว่าทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีมากกว่าทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ แต่ถ้าดูสัดส่วนจำนวนเท่าพบว่าค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีปริมาณของเหล็กทั้งหมดมากกว่าทรายธรรมชาติอยู่แล้ว ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าทรายทั้งสองชนิดทั้งทรายที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและทรายที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเมื่อผ่านกระบวนการเคลือบเหล็กจะมีความสามารถในการสะสมเหล็กบนตัวดูดซับไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเหล็กที่สะสมบนตัวดูดซับ

ตัวอย่าง	ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนเคลือบ (UFCS)	ทรายธรรมชาติก่อนเคลือบ (UNCS)	ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ (FCS)	ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (NCS)
ปริมาณเหล็กที่สะสมบนตัวดูดซับ (mg/g)	1.24	0.94	9.37	6.98



รูปที่ 4.13 แสดงสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กทั้งหมดที่สะสมบนตัวดูดซับ

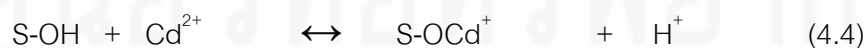
4.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

4.2.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม

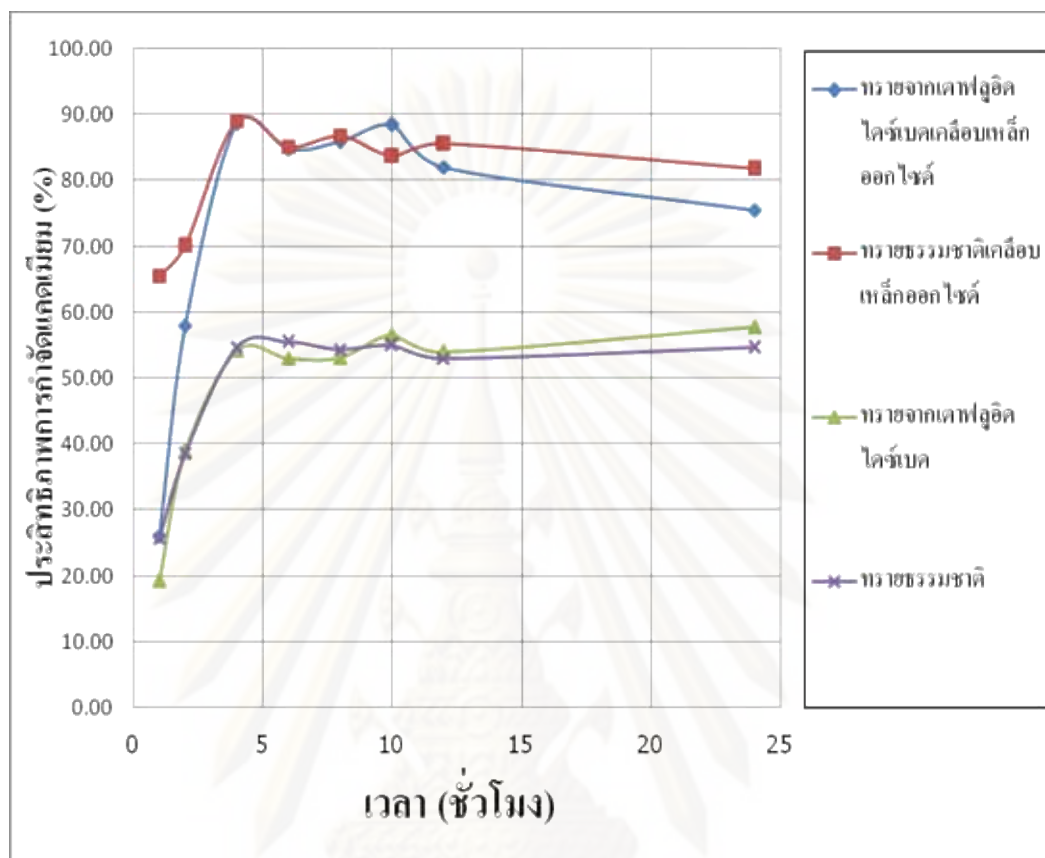
จากการทดลองเพื่อหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลต่างๆตั้งแต่ 60-1440 นาที โดยปรับพีเอชอยู่ที่ พีเอช 9 พบว่าจะมีอัตราการดูดซับแคดเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ในช่วง 120 นาทีแรก โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟมีความชันมาก โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 4 ชั่วโมง หรือ 240 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยร้อยละการกำจัดแคดเมียมของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ เท่ากับร้อยละ 88.66 และร้อยละในการกำจัดแคดเมียมของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ เท่ากับ 89.09

จากผลการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุล ผลการทดลองแสดงในตารางภาคผนวก ค ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดพบว่าเมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มมากขึ้น อัตราการดูดซับแคดเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะลดลง สังเกตได้จากความชันของกราฟทั้งสองจะลดลง เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเกือบคงที่ ดังนั้นเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับทั้งสองชนิดควรมีค่าประมาณ 4 ชั่วโมง และจากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับทรายที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีเพียงร้อยละ 50-60 ก็แสดงว่าการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ทรายได้ประมาณ 1.5 เท่า และจะสังเกตได้ว่าระหว่างทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วคือทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดกับทรายที่ยังไม่ผ่านการใช้งานคือทรายธรรมชาติพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าพีเอชหลังจากทำการดูดซับแล้วดังแสดงในตารางภาคผนวก ค พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิดมีค่าพีเอชลดลงเนื่องจากว่า เมื่อเกิดการดูดซับแคดเมียมที่ผิวออกไซด์ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก จะทำให้เกิดการปล่อยไฮโดรเจนไอออน ออกมา ดังแสดงในสมการ 4.4 และ 4.5 จึงทำให้พีเอชลดลง ถึงอย่างไรก็ตาม พีเอชสุดท้ายยังมากกว่า 8 ทั้งหมดจากพีเอชเริ่มต้น เป็นการยืนยันว่ามีกลไกการดูดซับของแคดเมียมบนพื้นผิวของเกอต์ไทต์ สอดคล้องกับ (Fergusson, 1990)

จากการทดลองการดูดซับโดยใช้ทรายที่ไม่ได้เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์พบว่าร้อยละการกำจัดค่อนข้างสูงอาจเนื่องจากว่าทำการทดลองที่พีเอช 9 ทำให้ส่วนที่ตกตะกอนบางส่วนทำหน้าที่เป็นแกนกลางซึ่งมีส่วนช่วยจับแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลายได้มากขึ้นดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง อีกทั้งธาตุ ซิลิกา และอลูมินา ยังมีสมบัติที่ช่วยในการดูดซับอีกด้วย



S-OH = คือบริเวณพื้นที่ผิวของเกอต์ไทต์ (Koretsky, 2000)



รูปที่ 4.14 ร้อยละในการกำจัดแคดเมียมที่เวลาเข้าสู่สมดุต่างๆ

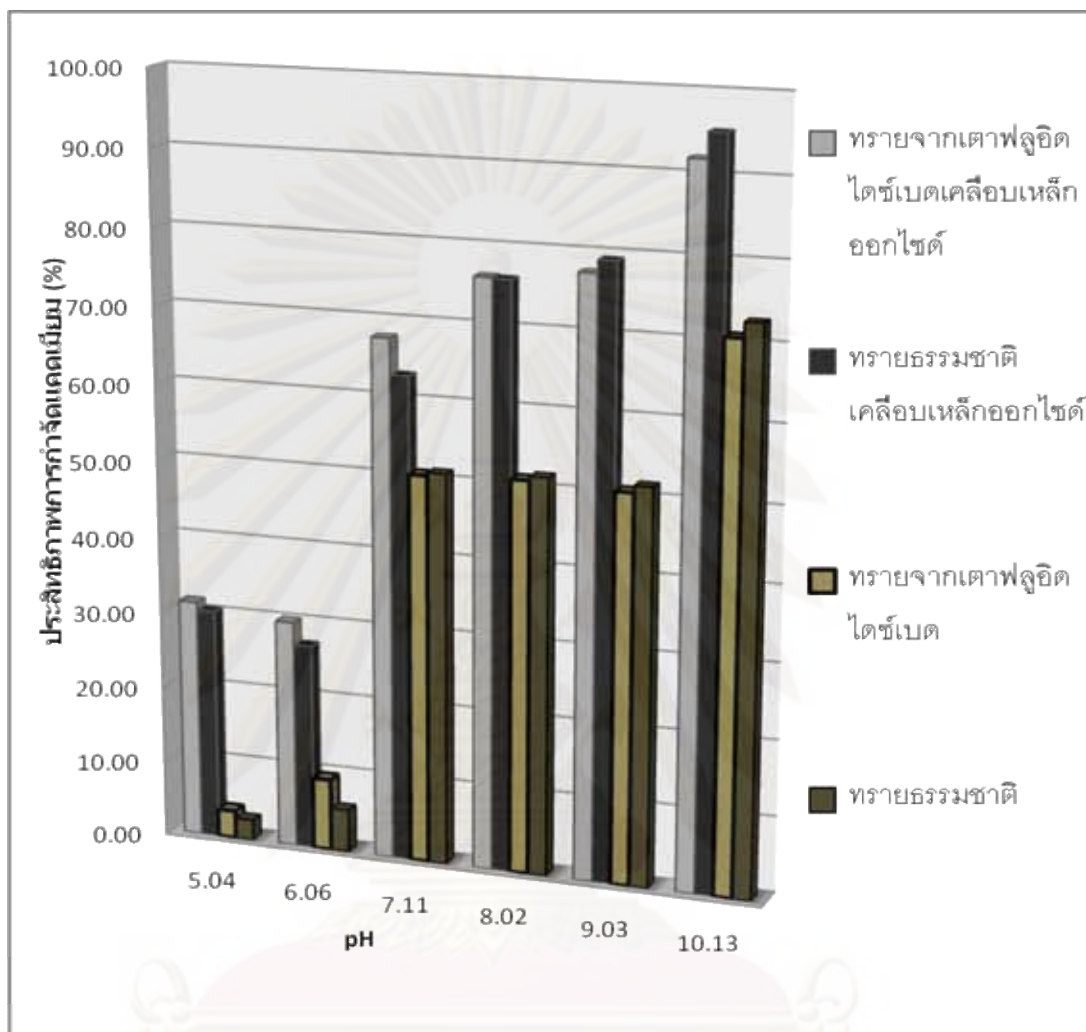
4.2.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม

ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับนอกจากมีผลต่อชนิดของแคดเมียมไอออน (II) ยังมีผลต่อประจุพื้นผิวของตัวดูดซับด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแคดเมียมไอออน (II) เพิ่มขึ้นจากพีเอช 2 ถึง พีเอช 10 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ที่ค่าพีเอช 10 แคดเมียมเริ่มตกตะกอนเป็นแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมค่อนข้างสูง มากกว่าร้อยละ 90 ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ จะพิจารณาพีเอช 5 ถึง พีเอช 9 เท่านั้น โดยนำตัว

ดูดซับทั้งสองชนิดอย่างละ 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลที่ 4 ชั่วโมง

ผลการทดลองแสดงในตารางภาคผนวก ง และเมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของสารละลายกับประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ดังแสดงในภาพที่ 4.15 พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแคดเมียมที่พีเอช 9 ประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกันในช่วงพีเอช 7-9 โดยร้อยละในการกำจัดแคดเมียมของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์เท่ากับ 77.59 และร้อยละในการกำจัดแคดเมียมของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์เท่ากับ 79.24 ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดคือไม่ต้องปรับพีเอช เนื่องจากการเตรียมตัวดูดซับให้อยู่ในรูปของเกอร์ไทต์จะต้องทำการปรับพีเอชของสารละลายเหล็กที่ใช้เคลือบบนพื้นผิวทรายให้ได้เท่ากับ 12 ดังนั้นตัวดูดซับที่ได้จะมีพีเอชประมาณ 9-10 เมื่อทำการดูดซับสารละลายแคดเมียมที่ไม่ได้ปรับพีเอช จึงไม่ทำให้พีเอชของสารละลายที่ทำการดูดซับลดลงไปกว่านี้ ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมไอออน

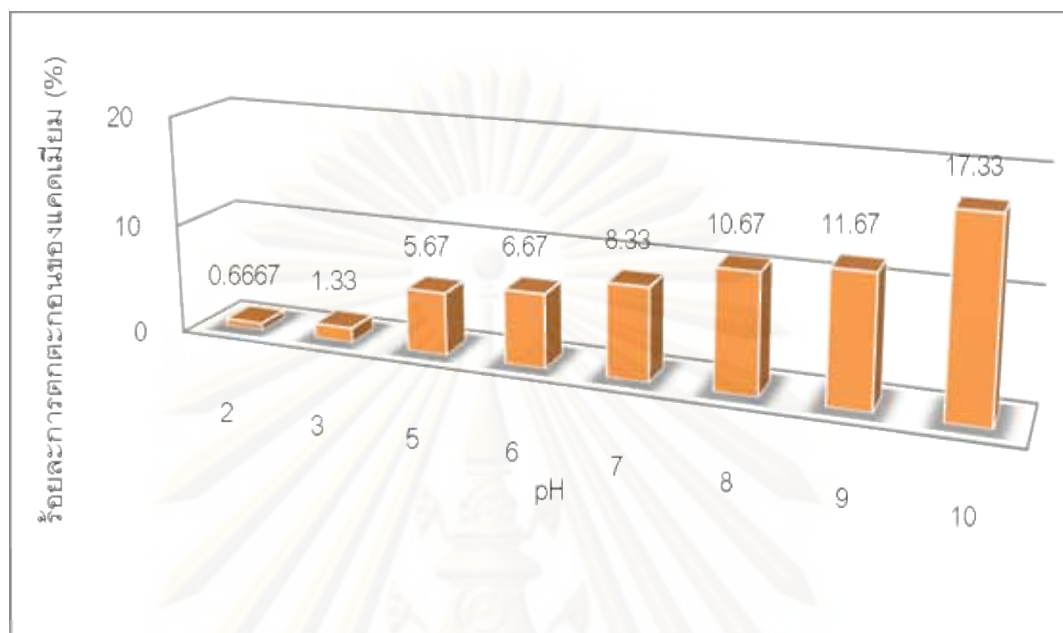
จากการทดลองผลของพีเอช พบว่า ในการทดลองที่พีเอชในเฟสน้ำเริ่มต้น 5-8 จะได้พีเอชสุดท้ายมีค่าอยู่ที่ช่วง 7-8 ทั้งนี้อาจเนื่องจากอิทธิพลของตัวดูดซับเองที่มีค่าพีเอชที่สูงอยู่แล้วในขั้นตอนการเตรียม โดยมีค่าประมาณ 9-10 จึงทำให้พีเอชสุดท้ายของระบบสูงขึ้น ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นในเฟสน้ำ 9 และ 10 แต่ให้ผลของพีเอชสุดท้ายอยู่ที่ 8 อาจเป็นเพราะว่า ในขั้นตอนการดูดซับเกิดการปล่อยไฮโดรเจนไอออน ออกมาด้วยทำให้พีเอชเริ่มต้นลดลงจากเดิมเล็กน้อยซึ่งให้ผลการทดลองเหมือนกันในตัวดูดซับทั้งสองชนิด



รูปที่ 4.15 ร้อยละในการกำจัดแคดเมียมที่พีเอชเริ่มต้นของเฟสน้ำ

นอกจากนี้ยังมีข้อสงสัยตัวแปรอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงพีเอชจะมีผลอย่างไรต่อการตกตะกอนของแคดเมียมไอออน (II) หรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบผลของปฏิกิริยาแคดเมียมไอออน (II) โดยไม่มีการเติมทราจเคลือบเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 4.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ผลการตกตะกอนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (II) ที่เกิดขึ้นที่พีเอชต่างๆ

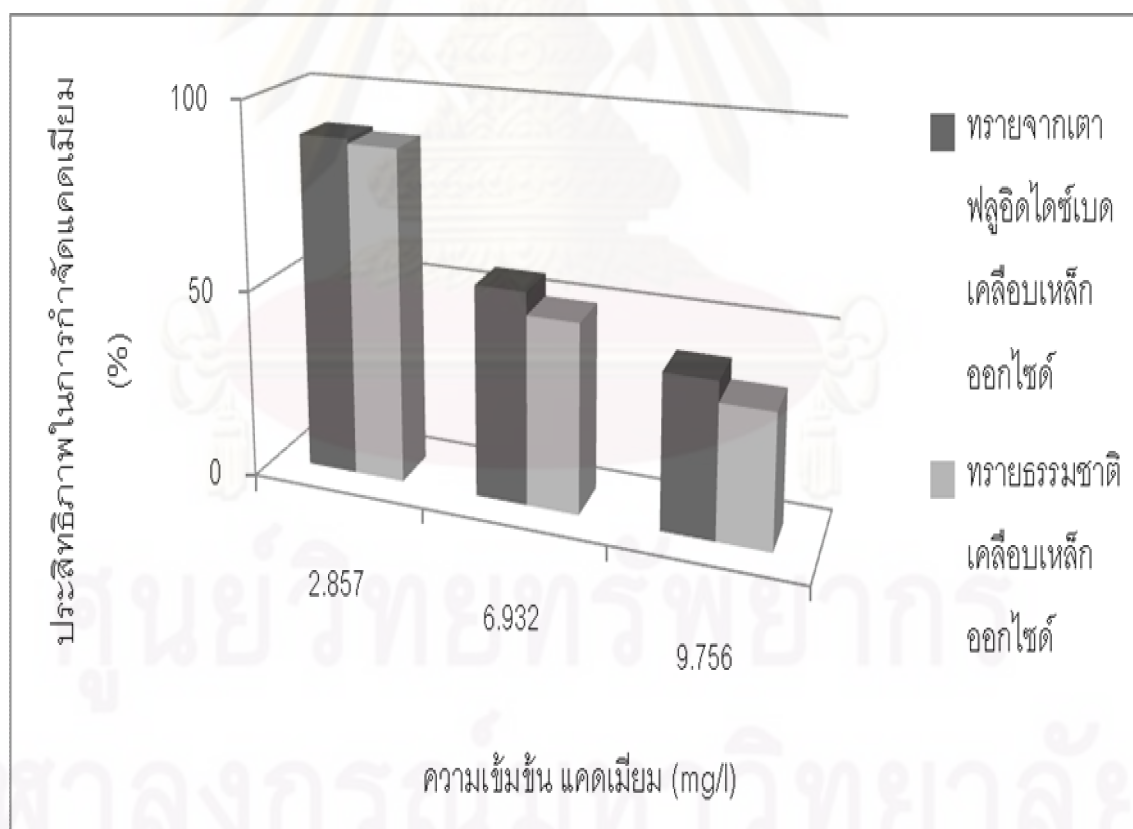
จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอช โดยไม่มีการทรายเป็นเกลือออกไซด์ พบว่าที่พีเอช 2 พีเอช 3 มีการตกตะกอนน้อยมาก แต่ที่พีเอช 5-9 จะมีตกตะกอนมากขึ้นเนื่องจากมีพีเอชที่สูงขึ้น ซึ่งการตกตะกอนของแคลเซียมจะสูงสุดที่พีเอช 10 ในการทดลองครั้งนี้จะไม่มีการปรับพีเอชของสารละลายแคลเซียมจึงมีพีเอชอยู่ในช่วง 7-8 ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะเป็นประสิทธิภาพที่หักลบออกจากร้อยละการตกตะกอนแล้วดังนั้นจึงเป็นผลของการดูดซับด้วยตัวดูดซับเองทั้งหมด

4.2.3 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดแคลเซียม

จากการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของแคลเซียมที่เหมาะสมต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดโดยมีความเข้มข้นของแคลเซียมที่ 2.857, 6.932 และ 9.756 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 4 ชั่วโมง โดยใช้พีเอชเป็นกลางที่ 7 นำตัวดูดซับทั้งสองชนิดอย่างละ 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายแคลเซียมเข้มข้นข้างต้น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที จากผลการทดลองแสดงในตารางภาคผนวก ง พบว่าจะมีอัตราการกำจัดแคลเซียมสูงสุดที่ความ

เข้มข้น 2.857 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 89.71 ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์มีร้อยละ 88.45 ส่วนที่ความเข้มข้น 6.932 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดลดลงมาก โดยตัวดูดซับที่เป็นทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีร้อยละ 55.81 ส่วนทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ร้อยละ 49.85 ส่วนที่ความเข้มข้น 9.756 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวดูดซับที่เป็นทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีร้อยละ 40.57 ส่วนทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ร้อยละ 35.12

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการกำจัดแคดเมียมด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิด จากการทดลองความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนที่เหมาะสมที่สุดต่อการกำจัดด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิด คือ 2.857 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ร้อยละในการกำจัดสูงสุด



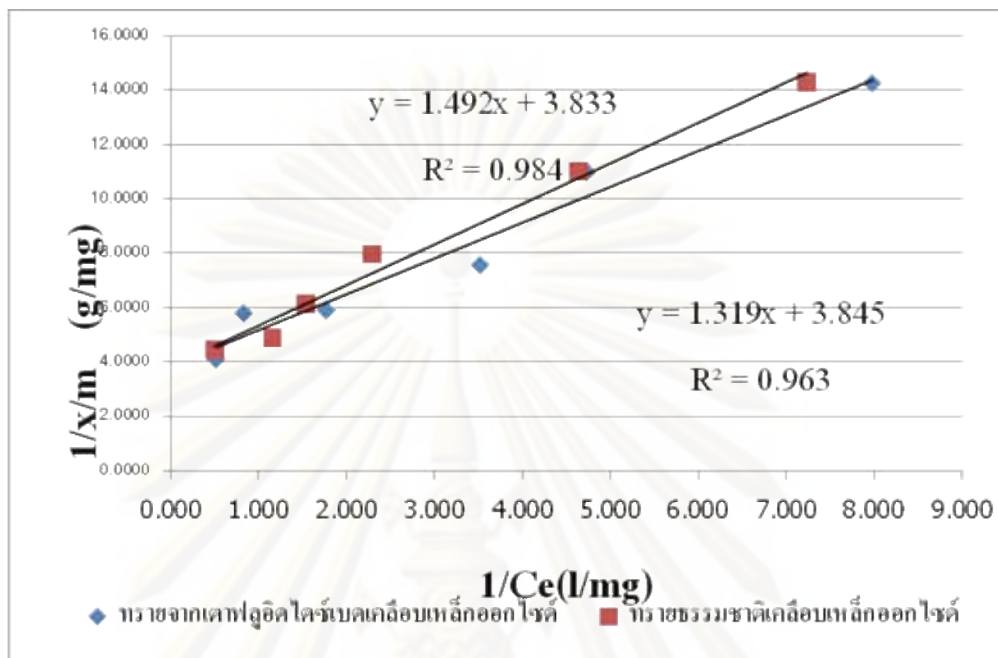
รูปที่ 4.17 ผลของร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.3 การวิเคราะห์หาไอโซเทอมที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

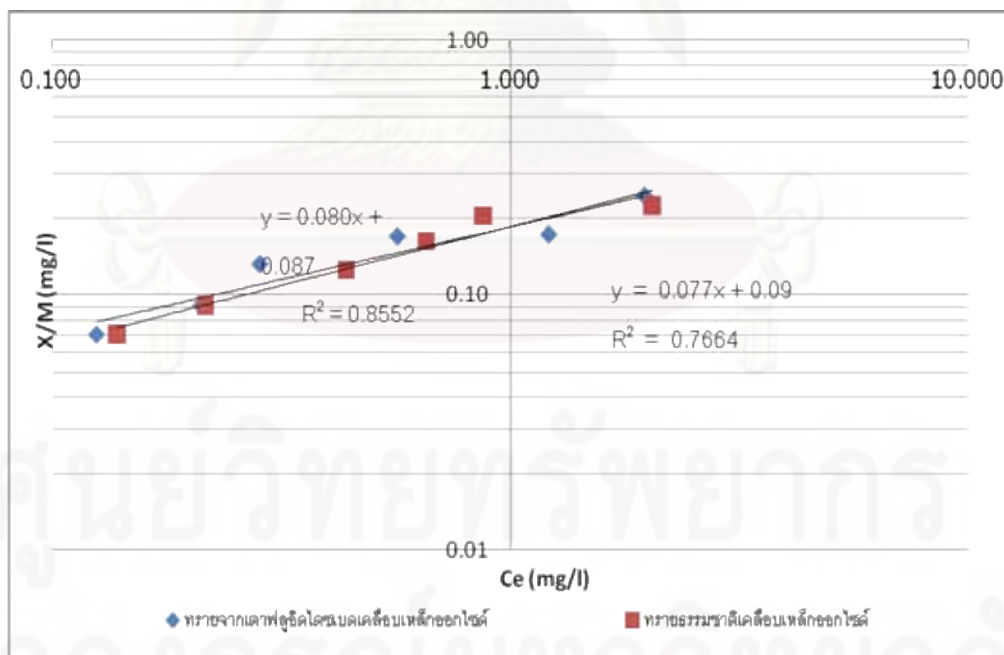
4.3.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

การทดสอบไอโซเทอมของตัวดูดซับ โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิด ปริมาณ 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 2.0, กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร สำหรับกำจัดแคดเมียม ที่ความเข้มข้น 2.948 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที นานเท่ากับการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับคือ 4 ชั่วโมง โดยไม่ได้ปรับพีเอช

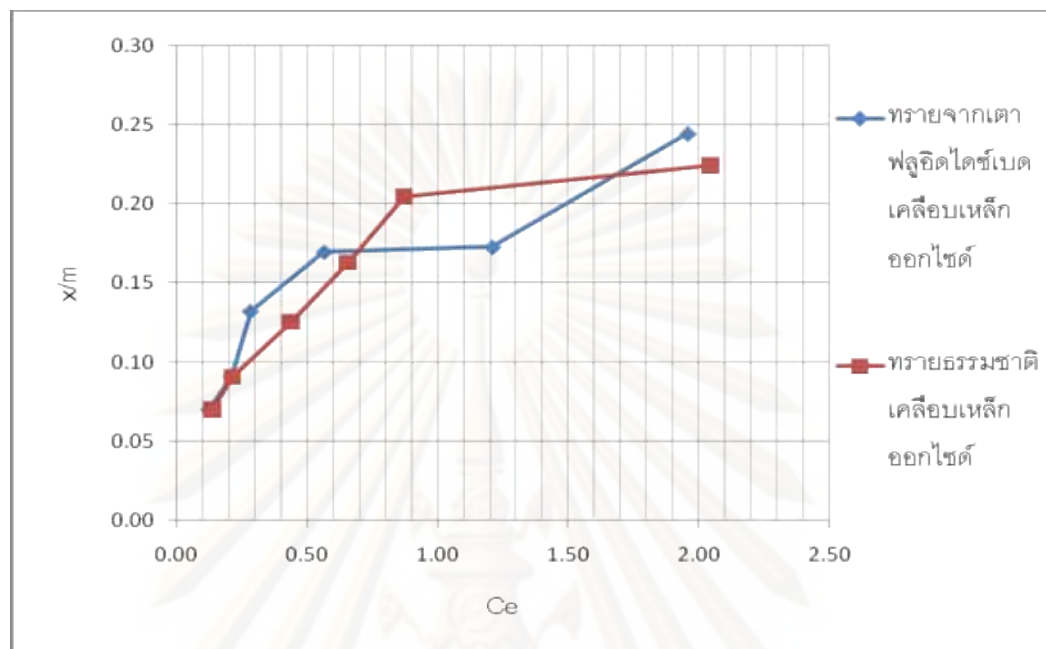
การพิจารณาผลการทดลอง โดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ ผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ และค่า R^2 ของไอโซเทอมดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่า 0.8552 และ 0.9634 ตามลำดับ ส่วนของธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่า 0.7664 และ 0.9844 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงดังนี้ ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ คือ $\log(x/m) = 0.0879 + 0.0809 \log(C_e)$ ส่วนทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ $\log(x/m) = 0.09 + 0.0772 \log(C_e)$ และสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ดังนี้ ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ คือ $(1/x/m) = 3.8456 + 1.3193 (1/C_e)$ ส่วนทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ $(1/x/m) = 3.8335 + 1.492 (1/C_e)$ จากผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมพบว่า สมการแบบแลงมัวร์ มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดแคดเมียม เนื่องจาก R^2 มีค่ามากกว่า จึงเป็นระบบดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เนื่องจากการดูดซับทางเคมีโดยที่แคดเมียมจะสร้างพันธะทางเคมีกับสารดูดซับ จากผลการวิเคราะห์โดยสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ พบว่าให้ค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยสารดูดซับจาก ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ มากที่สุดถึง 0.26 และ 0.261 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมสารดูดซับ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางภาคผนวก จ



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช



รูปที่ 4.20 รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิด

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich Adsorption Isotherm ของตัวดูดซับ

ตัวอย่าง	Langmuir constants			Freundlich constants		
	a (mg/g)	b (l/mg)	R ²	K _f (mg/g)	1/n (l/g)	R ²
ทรายธรรมชาติ เคลือบเหล็ก ออกไซด์	0.261	2.57	0.9844	1.23	0.0772	0.7664
ทรายจากเตาฟลูอิด ไดซ์เบดเคลือบเหล็ก ออกไซด์	0.26	2.92	0.9634	1.224	0.0809	0.8552

แบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich Adsorption Isotherm มีรูปแบบสมการดัง
สมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

Langmuir Adsorption Isotherm

$$\frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \quad (4.6)$$

โดยที่ X/M = ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

a = ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ต่อหน้าหนึ่งของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ)

b = ค่าคงที่ในการกระจายตัวในการดูดซับ (Adsorption Distribution Constant)

Freundlich Adsorption Isotherm

$$X/M = K_f C_e^{1/n} \quad (4.7)$$

โดยที่ K_f = sorption capacity (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Adsorption intensity)

จากการทดลองสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/x/m)$ และ $(1/C_e)$ เพื่อการหาค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด หรือ Q จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/x/m)$ และ $(1/C_e)$ จากสมการ $(1/x/m) = 3.8456 + 1.3193 (1/C_e)$ ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และ $(1/x/m) = 3.8335 + 1.492 (1/C_e)$ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/x/m)$ และ $(1/C_e)$ ได้จุดตัดแกน Y คือ $1/a$ มีค่าเท่ากับ 3.8456 และ 3.8335 ตามลำดับ ค่า a มีค่าเท่ากับ 0.26 และ 0.261

มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมสารดูดซับ ดังนั้นได้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด a มีค่าเท่ากับ 0.26 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมสารดูดซับทั้งสองชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จากการสังเกตกราฟจากรูปที่ 4.20 มีลักษณะรูปร่างแบบ L-shape ซึ่งเป็นการดูดติดผิวที่มีโมเลกุลเพียงชั้นเดียวบนผิวของสารดูดติดผิว และมีการรบกวนจากตัวทำละลายน้อย จึงเป็นการช่วยยืนยันได้ว่าเป็นการดูดติดผิวแบบ Langmuir Adsorption Isotherm

4.3.2 ผลการศึกษาการคายซับของตัวดูดซับ

ผลการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องสำหรับในการศึกษาการคายซับแคดเมียมไอออน (II) ด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น โดยนำตัวดูดซับทั้งสองชนิด ชนิดละ 1 กรัม นำไปดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 2.948 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.220 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น แคดเมียมที่ถูกดูดซับอยู่ในตัวดูดซับเท่ากับ 2.728 มิลลิกรัมต่อลิตร นำตัวดูดซับทั้งสองชนิดดังกล่าวที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมแล้ว มาศึกษาการคายซับ โดยการใช้น้ำกลั่น และสารละลายกรดอะซิติก

ผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทดลองด้วยน้ำกลั่นมีปริมาณแคดเมียมคายออกมาจากรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และ ทราจธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ร้อยละ 4.11 และ 3.75 ตามลำดับ แสดงว่ามีการละลายของแคดเมียมไอออนด้วยน้ำกลั่นน้อย ส่วนการทดลองด้วยกรดอะซิติก 2% และ 5% ไม่แตกต่างกัน โดย ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ใช้กรด 2% ร้อยละ 46.57 และใช้กรด 5% ร้อยละ 47.23 ส่วน ทราจธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ใช้กรด 2% ร้อยละ 43.87 และ ใช้กรด 5% ร้อยละ 45.98 สาเหตุที่แคดเมียมไอออน(II)ถูกคายออกมาด้วยสารละลายกรด เนื่องจากในสารละลายกรดมี H^+ ซึ่งสามารถเข้าไปแทนที่หรือไล่ที่แคดเมียมไอออน(II) ที่เกาะอยู่ที่ผิวของเหล็กออกไซด์ให้หลุดออกมา สอดคล้องการศึกษาของ (Davis และ Upadhyaya, 1996) ทั้งนี้พบว่าแคดเมียมไอออนมีการถูกคายออกมาได้

น้อย เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการดูดซับของตัวดูดซับทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และ ทฤษฎีธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ เป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ซึ่งการดูดซับทางเคมีนั้นเป็นการดูดซับที่มีการถ่ายอิเล็กตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารละลายแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) กับพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ ทำให้เกิดพันธะทางเคมีขึ้นมา ทำให้มีการหลุดออก (Desorption) ของแคดเมียมได้น้อยแต่พันธะเคมีก็ไม่แข็งแรงพอที่จะเอาชนะสารละลายกรดจึงมีบางส่วนที่ถูกชะละลายออกมาด้วย ด้วยเหตุนี้การนำตัวดูดซับทั้งสองไปใช้งานจริง เมื่อใช้งานจนตัวดูดซับหมดสภาพแล้ว จะสามารถทำการคืนสภาพ (Regeneration) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 4.5 ผลการคายซับของตัวดูดซับ

สารละลายที่ใช้		ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์	ทฤษฎีธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์
น้ำกลั่น	Cd ²⁺ ที่ถูกคายออก (mg/l)	0.11	0.10
	Cd ²⁺ ที่ถูกคายออก (%)	4.11	3.75
CH ₃ COOH 2%	Cd ²⁺ ที่ถูกคายออก (mg/l)	1.27	1.19
	Cd ²⁺ ที่ถูกคายออก (%)	46.57	43.87
CH ₃ COOH 5%	Cd ²⁺ ที่ถูกคายออก (mg/l)	1.28	1.25

	Cd ²⁺ ที่ถูกคาย ออก (%)	47.23	45.98
--	---------------------------------------	-------	-------

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ดังรูปที่ 4.20 โดยการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยแคดเมียมมีความเข้มข้น 2.706 mg/l ในการทดลองจะปล่อยน้ำเสียไหลผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ความสูงของชั้นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 90 เซนติเมตร มีการเก็บตัวอย่าง จากที่ชั้นความลึกของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทุก 30 เซนติเมตร ตั้งแต่ที่ 30,60 และ 90 เซนติเมตร โดยจะทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเสียในถังดูดติดผิวที่ 25 มิลลิลิตร/นาที ค่าภาระถัง (Column Loading Rate) 0.0024 ลบ.ม./(ตร.ม.-ชั่วโมง) จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกมาจากคอลัมน์ จนกระทั่งน้ำที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์มีความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำออกต่อน้ำเข้ามีค่าประมาณ 1)

ในการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ความสูงของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ต่างๆกัน ส่วนที่สองเป็นการศึกษา คำนวณค่า q_0 และ k_1 จากสมการของ Thomas จาก Breakthrough curve ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ส่วนที่สามเป็นการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่



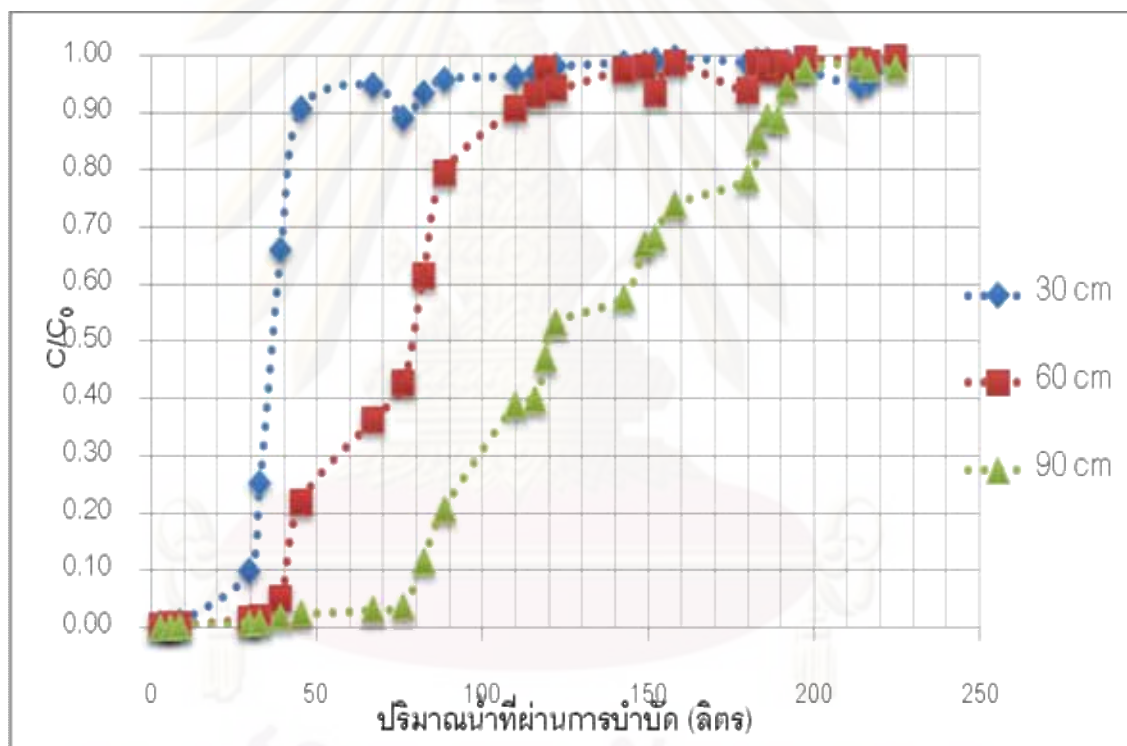
รูปที่ 4.21 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง

4.4.1 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแคดเมียมไอออน (II) ที่ความสูงของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดแคดเมียมไอออน(II) ที่ระดับความสูงของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 30,60 และ 90 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตร ความเข้มข้นของแคดเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้น โดยน้ำเสียจะไหลจากบนลงล่างแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจะหมดสภาพจากส่วนบนก่อนจากนั้นค่อยๆหมดจนถึงส่วนกลางและถึงส่วนล่างของคอลัมน์ในที่สุด จุดสูงสุดของเส้นกราฟคือจุดที่ความเข้มข้นน้ำเสียขาออกต่อความเข้มข้นของน้ำเสียขาเข้า (C/C_0) เท่ากับ 1 แต่จุดที่หมดสภาพคือ (C/C_0) คือ 0.9

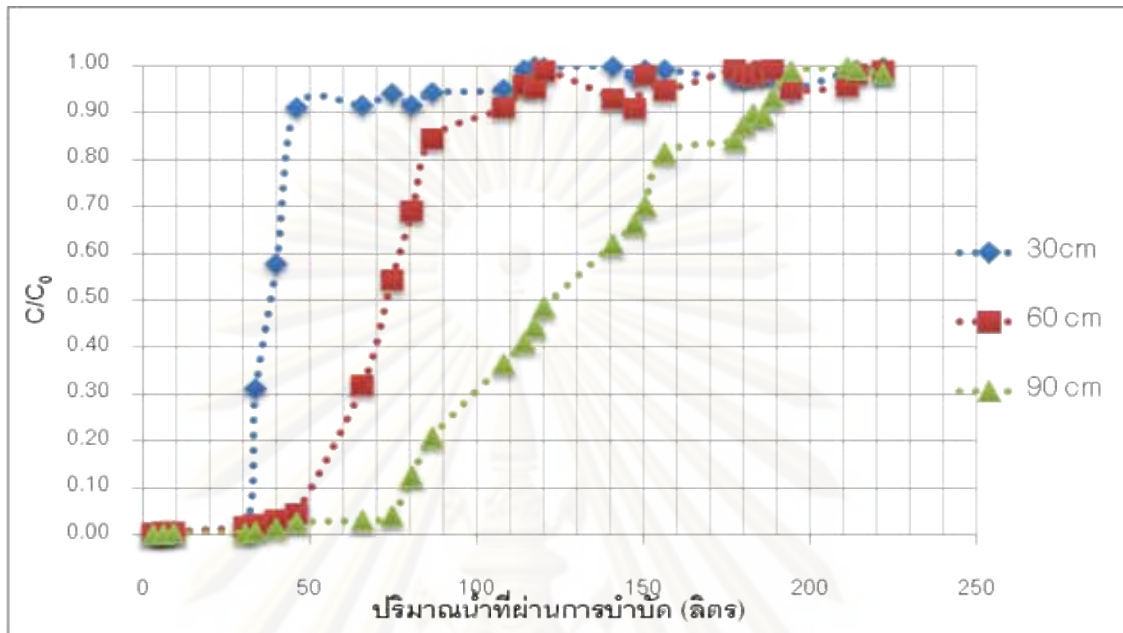
จากตารางที่ 4.6 พบว่าที่ความสูง 90 เซนติเมตรของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เคลือบเหล็กออกไซด์ มีปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงสุดคือมีปริมาณ 191.64 ลิตร หรือคิดเป็น 345.8 Bed Volume (BV) โดย Bed Volume (BV) มีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่อปริมาตรของชั้นตัวดูดซับในคอลัมน์ ในภาคผนวก ฉ โดยใช้เวลา 126 ชั่วโมง ส่วนที่ความสูง 60 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำ 109.8 ลิตร หรือคิดเป็น 297.2 Bed Volume (BV) ใช้เวลา 72 ชั่วโมง ส่วนที่ความสูง 30 เซนติเมตร 45.18 ลิตรหรือคิดเป็น 244.6 Bed Volume (BV) ใช้เวลา 30 ชั่วโมง ส่วนทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ดังรูปที่ 4.22 พบว่าที่ความสูง 90 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงสุดคือมีปริมาณ 188.57 ลิตร หรือคิดเป็น 340.3 Bed Volume (BV) โดยใช้เวลา 126 ชั่วโมง ส่วนที่ความสูง 60 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำ 107.99 ลิตรหรือคิดเป็น 292.3 Bed Volume (BV) ใช้เวลา 72 ชั่วโมง ส่วนที่ความสูง 30 เซนติเมตร 45.96 ลิตร หรือคิดเป็น 248.8 Bed Volume (BV) ใช้เวลา 30 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิด คือ ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ดังแสดงดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.25 พบว่าประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวกลางดูดซับแคดเมียมไอออน (II) ไม่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงค่าพีเอชของสารละลายแคดเมียมไอออน(II) ที่ออกจากระบบที่ ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 เซนติเมตร พบว่า ในช่วงแรกที่เริ่มเดินระบบ พีเอชจะอยู่ที่ 9 หลังจากนั้นเมื่อเดินระบบไปนานมากขึ้นพีเอชจะลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 8 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเกิดการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดพันธะเคมีขึ้นทำให้มีการหลุดออกมาของ H^+ จึงทำให้พีเอชลดลง ตามสมการที่ 4.1 และ 4.2

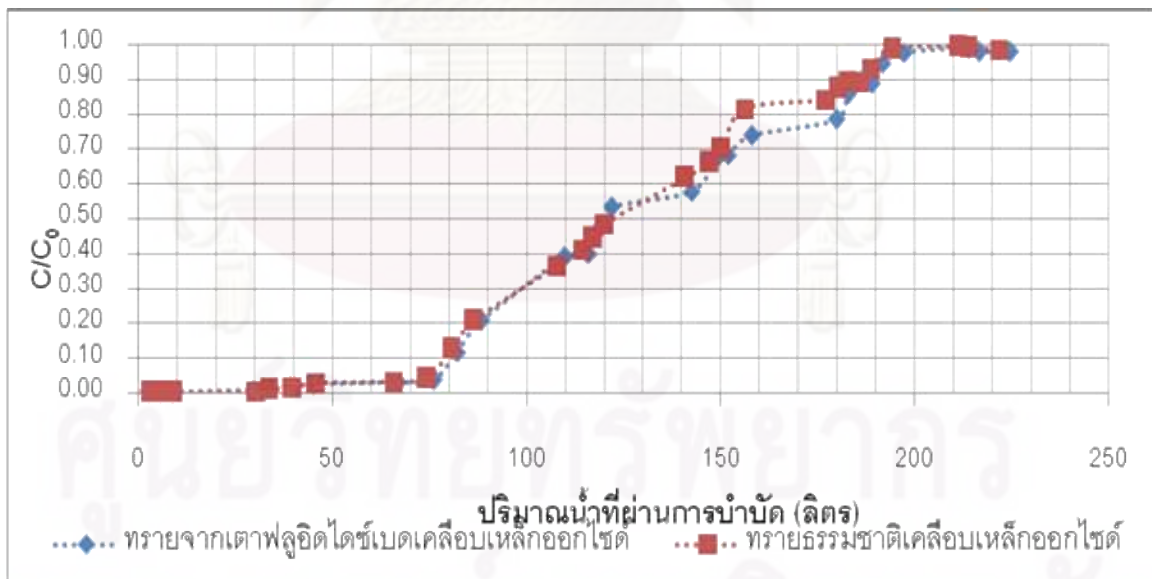


รูปที่ 4.22 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้า โดยใช้ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับ

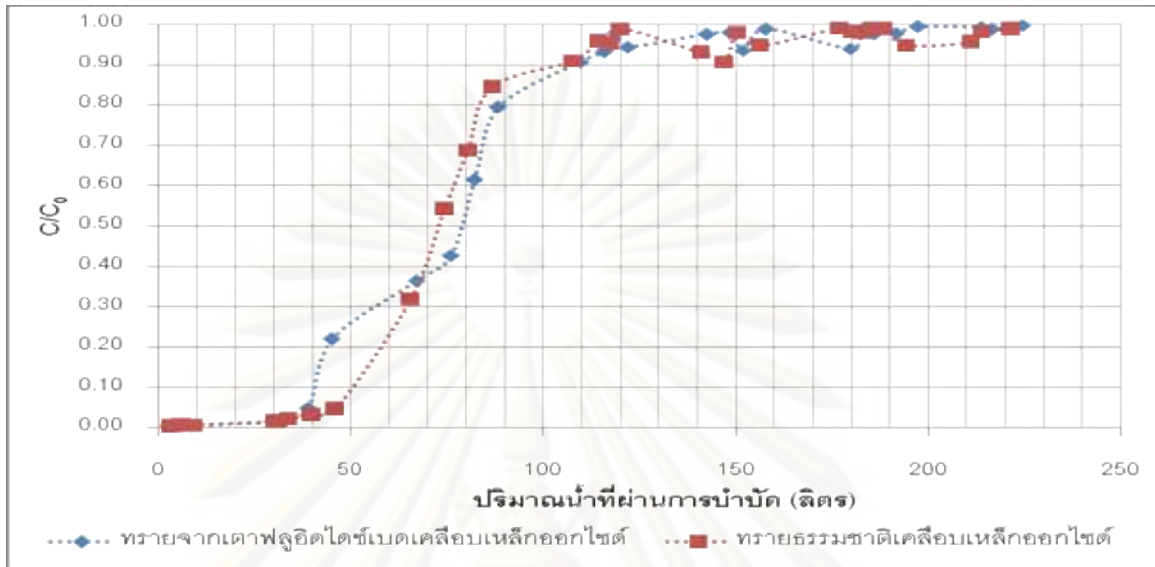
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



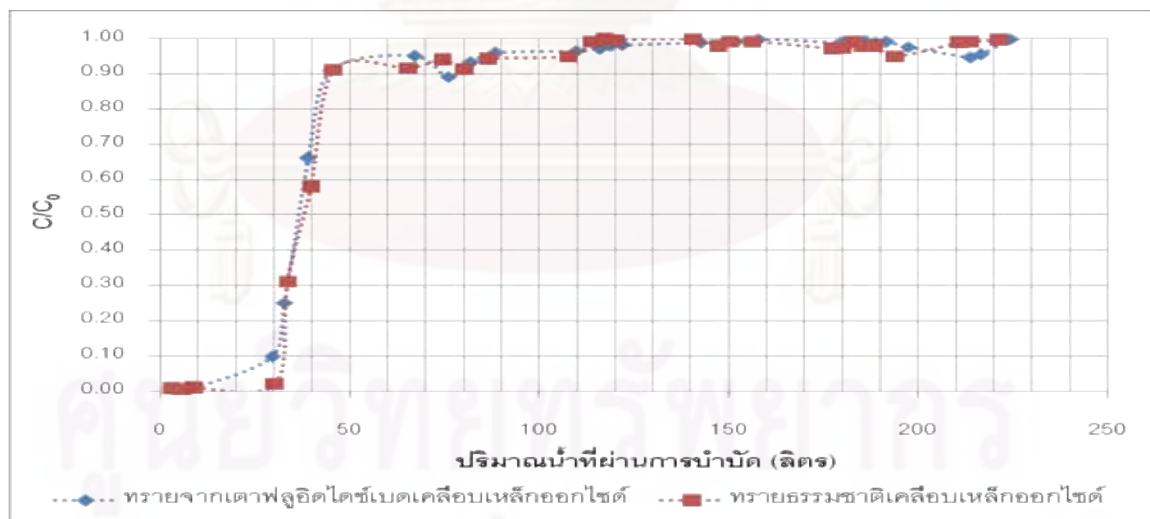
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้าโดยใช้ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้า ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร



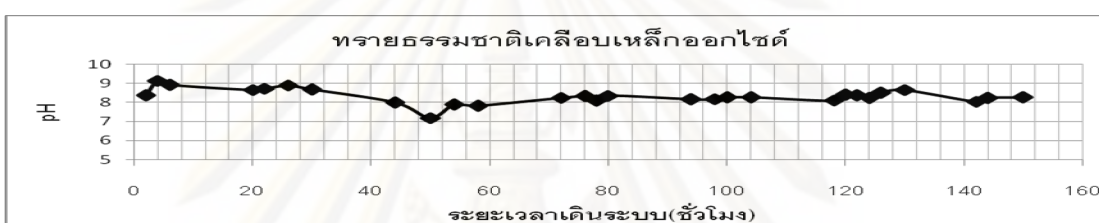
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้า ความสูงของตัวกลางดูดซับ 60 เซนติเมตร



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้า ความสูงของตัวกลางดูดซับ 30 เซนติเมตร



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเดินระบบกับค่าพีเอชของสารละลายแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) ที่ออกจากระบบที่ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 เซนติเมตร



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเดินระบบกับค่าพีเอชของสารละลายแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (II) ที่ออกจากระบบที่ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมในคอลัมน์ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตร

ตัวกลางที่ใช้	ความสูง ชั้น ตัวกลาง (ซม.)	ปริมาตร ชั้น ตัวกลาง (ลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลาง (กรัม)	ปริมาตร น้ำไหล ผ่าน (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ ไหลผ่าน/ ปริมาตรของ ชั้นถ่าน (BV)
ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์ เบดเคลือบเหล็กออกไซด์	30	0.1847	198.3516	45.18	244.6129
	60	0.3695	400.5713	109.8	297.1583
	90	0.5542	598.7842	191.64	345.7957
ทราจธรรมชาติเคลือบ เหล็กออกไซด์	30	0.1847	198.3516	45.96	248.8360
	60	0.3695	400.5713	107.99	292.2598
	90	0.5542	598.7842	188.57	340.2562

4.4.2 การศึกษา คำนวณค่า q_0 และ k_1 จากสมการของ Thomas จาก Breakthrough curve ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

เพื่อศึกษาหาค่า q_0 และ k_1 จากสมการของ Thomas ในการบำบัดแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้คอลัมน์ดูดซับ ซึ่งผลจะแสดงตามรูปที่ 4.37 และ 4.38 และภาคผนวก ซ ทำการเขียนกราฟตามสมการของ Thomas ดังนี้

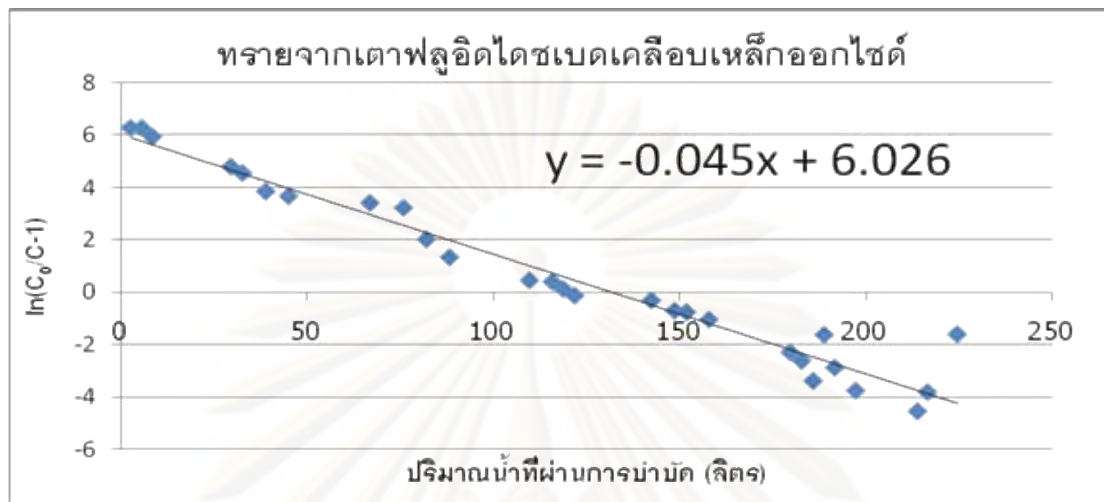
$$\ln\left(\frac{C_0}{c} - 1\right) = \frac{k_1 q_0 M}{Q} - \frac{k_1 C_0 V}{Q} \quad (4.8)$$

$$\text{โดยค่าความชัน (slope)} = \frac{k_1 C_0}{Q}$$

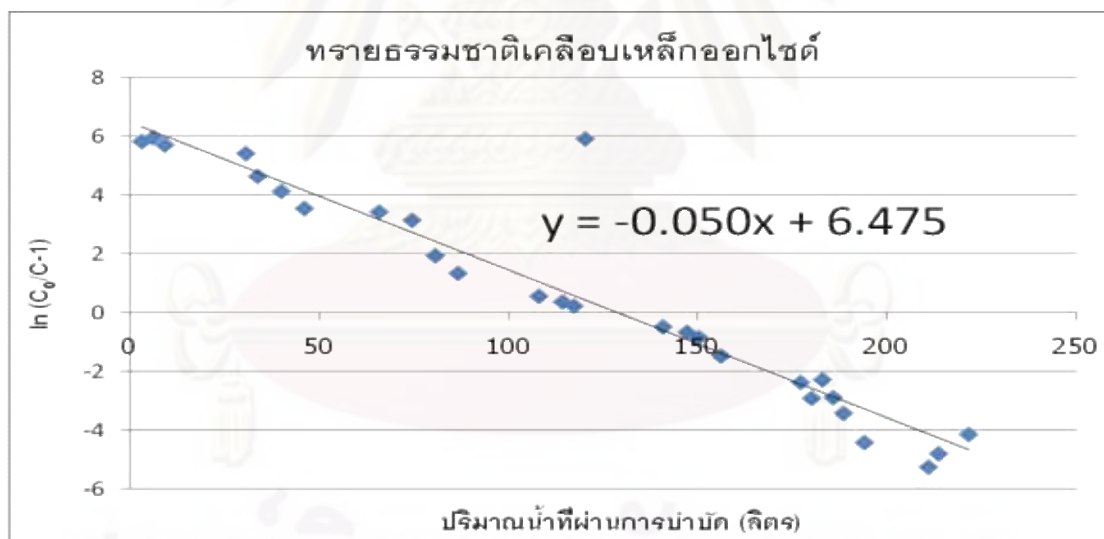
$$\text{ค่าจุดตัดแกน Y} = \frac{k_1 q_0 M}{Q}$$

เมื่อทำการเขียนกราฟตามตารางการคำนวณภาคผนวก ซ จะได้สมการของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด คือ $\ln(c_0/c - 1) = 6.026 - 0.045(V)$ และจากทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ คือ $\ln(c_0/c - 1) = 6.475 - 0.050(V)$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับ $\ln(C_0/C-1)$ ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดกับ $\ln(C_0/C-1)$ ของสารละลายแคดเมียม 2.706 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตรที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร

ดังนั้นจะสามารถหา k_1 ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์จาก

$$k_1 = \frac{0.045 Q}{C_0} \text{ l}^{-1}$$

$$k_1 = 0.0253 \frac{\text{l}}{\text{hr.mg}}$$

และหาค่า q_0 จาก $q_0 = \frac{6.026 \times Q}{k_1 M}$

$$q_0 = 0.596 \text{ mg/g}$$

ส่วน หา k_1 ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์

$$k_1 = \frac{0.050 Q}{C_0} \text{ l}^{-1}$$

$$k_1 = 0.0278 \frac{\text{l}}{\text{hr.mg}}$$

หาค่า q_0 จาก $q_0 = \frac{6.475 \times Q}{k_1 M}$

$$q_0 = 0.583 \text{ mg/g}$$

จากการคำนวณหาความจุของการดูดซับแบบคอลัมน์ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดพบว่า ค่าความจุในการดูดซับ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีความจุในการดูดซับ 0.596 mg/g และของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์มีความจุในการดูดซับ 0.583 mg/g

จากการทดลองเป็นการทำนายสมรรถนะของระบบ โดยใช้ค่า $k_1 = 0.3 \text{ l/hr.mg}$ ซึ่งเป็นอัตราค่าคงที่ที่ได้จากการคำนวณ scale up เพื่อนำค่านี้ไปใช้ออกแบบระบบจริงโดยสามารถนำค่า k_1 นี้ไปคำนวณตามสมการของ Thomas เช่นเดิมเพื่อหาค่าความเข้มข้น ขาเข้าหรือขาออกจากระบบที่

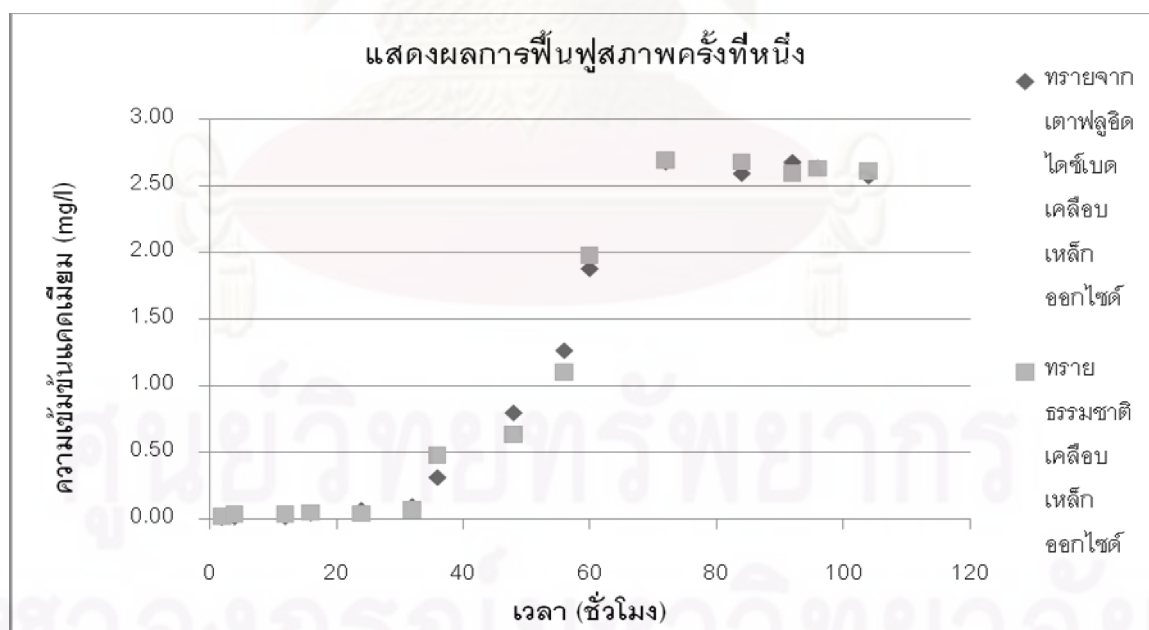
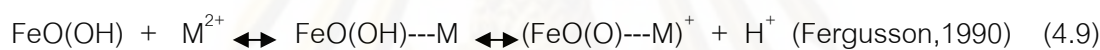
ต้องการ หรือ ค่า q_0 ที่ได้อยู่ที่ 0.6 mg/g เป็นค่าความจุสูงสุดที่นำไปใช้คำนวณหามวลหรือปริมาตรของตัวดูดซับที่ใช้ในการสร้างระบบจริง

4.4.3 การฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

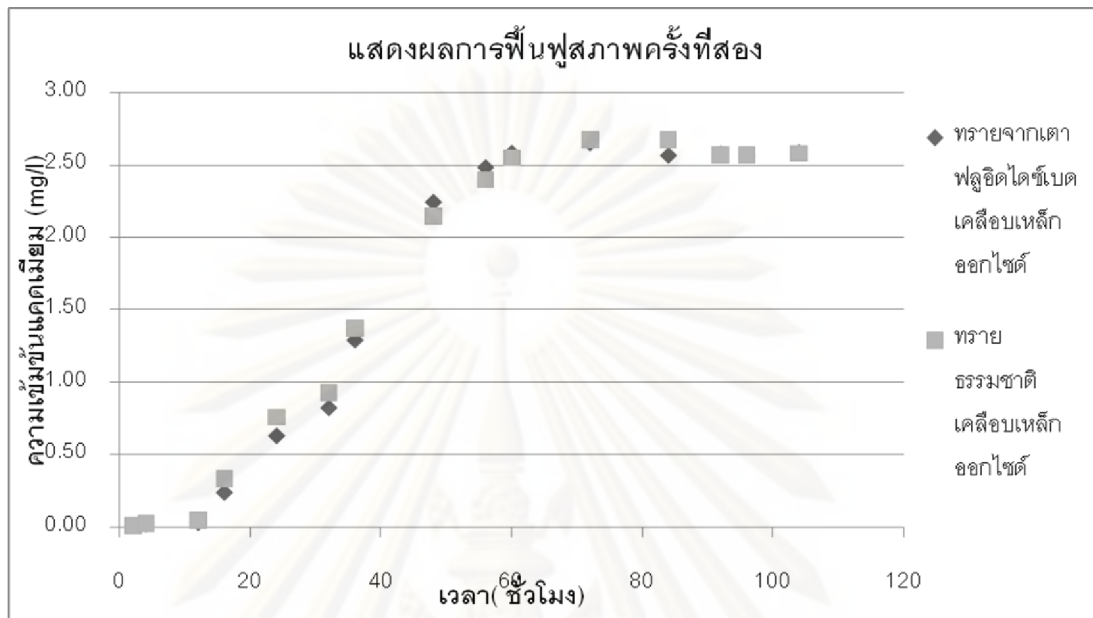
ทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดซับหลังจากทำการดูดซับสารละลายแคดเมียมไอออน (II) ที่ความเข้มข้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อดูรอบการทำงานว่าสามารถใช้ตัวกลางดูดซับได้กี่รอบโดยการทดลองนี้จะทำการฟื้นฟูสภาพทั้งหมด 5 รอบด้วยกัน ซึ่งในแต่ละรอบหลังจากที่ทำการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดอะซิติก 2% (CH_3COOH) แล้วจึงทำการล้างตัวดูดซับด้วยการผ่านน้ำกลั่นจนกระทั่งพีเอชเป็นกลางคองที่ แล้วจึงทำการดูดซับรอบต่อไป แสดงผลการทดลองตามภาคผนวก ข

จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.34 แสดงผลการดูดซับหลังจากทำการฟื้นฟูสภาพ พบว่าเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่หนึ่ง การดูดซับจะหมดสภาพอยู่ที่ 72 ชั่วโมงของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะเห็นได้ว่าหลังจากฟื้นฟูสภาพแล้วประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงจากเดิมโดยก่อนที่จะฟื้นฟูสภาพจะใช้เวลาดูดซับ 118 ชั่วโมง ซึ่งอธิบายได้ว่าแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนไอออนในรอบการทำงานและจับกับออกไซด์ของเหล็กได้ดี เนื่องจากเป็นการดูดซับทางเคมีเกิดพันธะทางเคมีที่แข็งแรง สารรีเจนเนอแรนต์ (CH_3COOH 2%) ไม่สามารถเอาชนะได้ ดังจะเห็นได้จากการทดลองการคายซับที่มีการคายซับไม่ถึง ร้อยละ 50 แต่ก็มีบางส่วนที่สามารถหลุดออกมาได้ จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง แคดเมียมไอออนกับไฮโดรเจนไอออน บนผิวสัมผัสไม่หมด ดังสมการที่ 4.9 ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์ที่มีหมู่ไฮโดรเจนไอออนเกาะอยู่มีน้อยกว่าตัวกลางที่ใช้งานครั้งแรกเป็นผลทำให้หมดสภาพเร็วกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 5 รอบการทำงานพบว่า เวลาที่ใช้ในการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันมีค่าอยู่ระหว่าง 60-72 ชั่วโมง ขณะที่พีเอชของน้ำออกของ 5 รอบการทำงาน ตามภาคผนวก ข มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยในช่วงแรกพีเอชมีค่า 6-7 และพีเอชจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ 7.5-8.5 เนื่องจากว่า เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพไปเรื่อยๆตัวดูดซับจะปล่อยหมู่ไฮดรอกซิลไอออนออกมามากขึ้นจึงทำให้พีเอชเพิ่มมากขึ้นในช่วงหลัง นอกจากนี้ ตามตารางภาคผนวก ข จะเห็นได้ว่าช่วงหลัง หลังจากที่ได้จุดหมดสภาพไปแล้ว ความเข้มข้นของแคดเมียมที่หลุดออกมาที่วัดได้นั้นมีการลดลงอีกเล็กน้อยจากความเข้มข้น ฆ่าออก

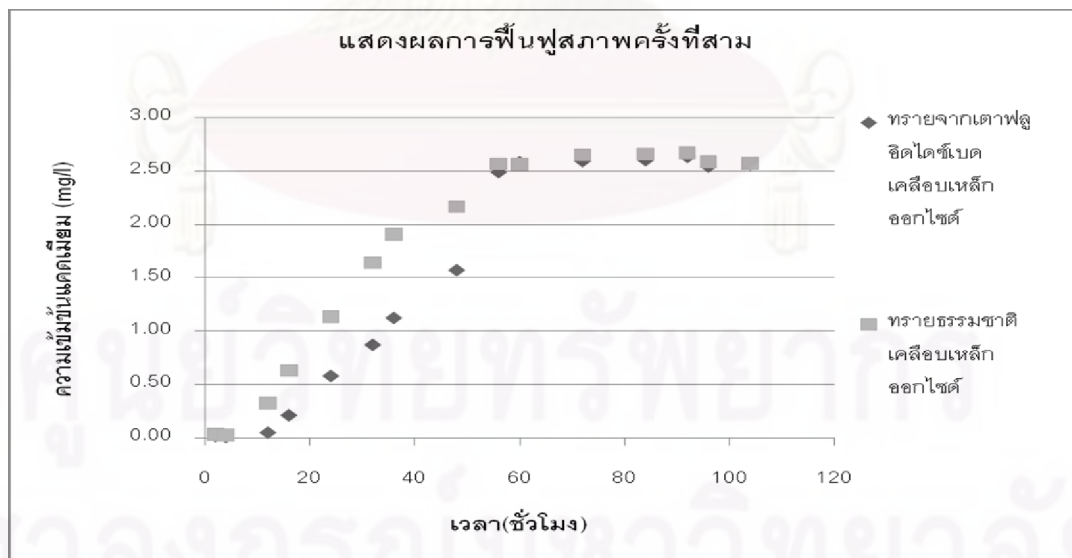
อาจมาจากอิทธิพลของพีเอชที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังทำให้มีการดูดซับกลับไปในตัวดูดซับอีกเล็กน้อย จากนั้นจึงทำการฟื้นฟูสภาพครั้งที่สองแล้วทำการดูดซับต่อพบว่า การดูดซับจะหมดสภาพอยู่ที่ 60 ชั่วโมง และ 56 ชั่วโมง ของทรายจากเตาฟลูอิดไดเซดเบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการฟื้นฟูสภาพต่อเป็นครั้งที่สาม พบว่าการดูดซับหมดสภาพที่ 60 ชั่วโมงของตัวดูดซับทั้งสองชนิด การฟื้นฟูสภาพครั้งที่สองการดูดซับหมดสภาพอยู่ที่ 60 ชั่วโมงของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ส่วนการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ห้าซึ่งเป็นการฟื้นฟูสภาพครั้งสุดท้าย การดูดซับหมดสภาพที่ 60 และ 72 ชั่วโมง ของทรายจากเตาฟลูอิดไดเซดเบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ตามลำดับ จากกราฟการฟื้นฟูสภาพทั้ง 5 รอบการทำงานจะเห็นได้ว่า ผลของตัวดูดซับทั้งสองชนิดต่อการฟื้นฟูสภาพไม่แตกต่างกัน



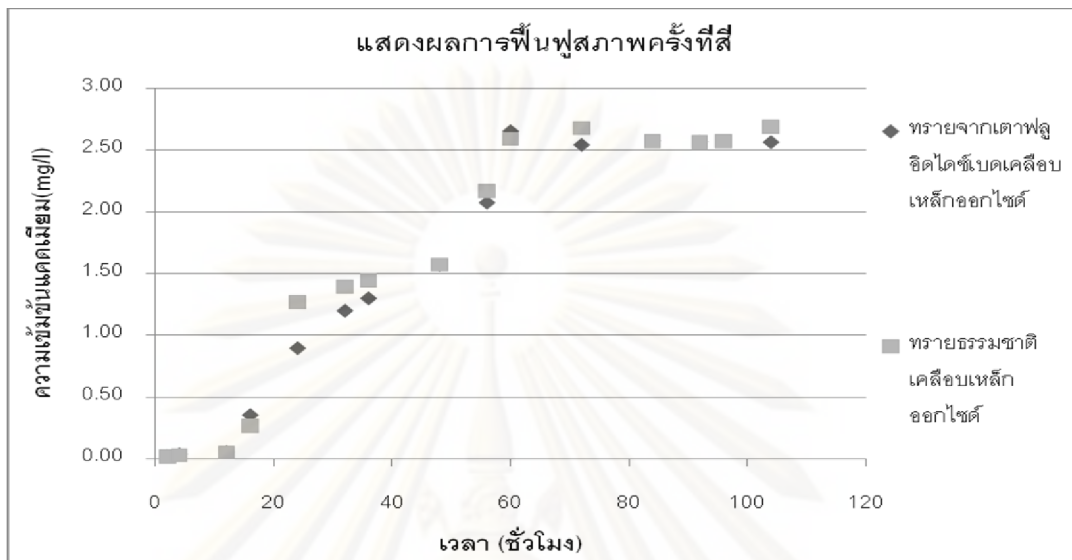
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมขาออกที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร



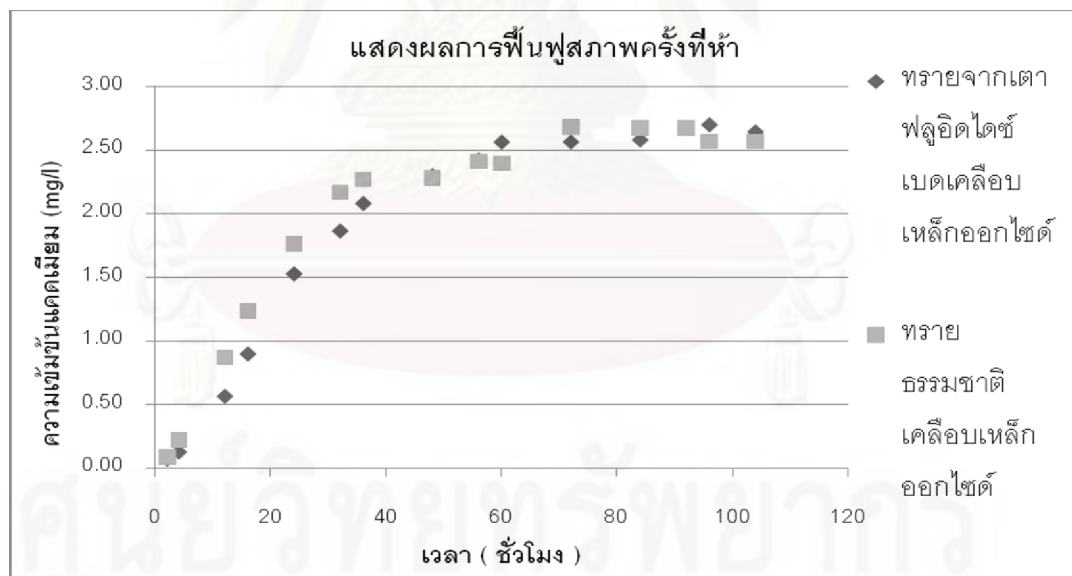
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมขาออกที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมขาออกที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมขาออกที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของแคดเมียมขาออกที่ความสูงของตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่เหมาะสมของตัวดูดซับ ในการดูดซับแคดเมียมไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยตัวดูดซับทั้งสองชนิด ซึ่งทำการทดลองทั้งแบบเทและแบบคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ในการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับทั้งสองชนิด พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมไอออนสูงสุดที่เวลาสัมพัทธ์ 4 ชั่วโมง โดยตัวดูดซับจากทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ มีร้อยละการดูดซับแคดเมียมไอออน เท่ากับ 88.66 ตัวดูดซับของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ มีร้อยละการดูดซับแคดเมียมไอออน เท่ากับ 89.09
- 2) ในการทดลองศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมไอออนพบว่า โดยพบว่าการดูดซับแคดเมียมไอออนมีประสิทธิภาพสูงในช่วงค่าพีเอชระหว่าง 7-9 และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าพีเอช 9 โดย โดยร้อยละในการกำจัดแคดเมียมของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ เท่ากับ 77.59 และร้อยละในการกำจัดแคดเมียมของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ เท่ากับ 79.24 แต่ร้อยละการกำจัดในช่วงพีเอช
- 3) ในการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนที่เหมาะสมในการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิด พบว่า การดูดซับแคดเมียมไอออนจะมีประสิทธิภาพดีที่ความเข้มข้นแคดเมียม 2.857 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์มีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 89.71 ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์มีร้อยละ 88.45

- 4) จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมไอออน พบว่า สอดคล้องกับสมการ Langmuir เป็นอย่างดี โดยตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าดูดซับสูงสุด เท่ากับ 0.26 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมตัวดูดซับ
- 5) ในการทดลองเพื่อศึกษาการคายซับของตัวดูดซับ ด้วยสารละลายกรดอะซิติก 2 เปอร์เซ็นต์ โดยทราบจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ร้อยละ 46.57 ส่วน ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ร้อยละ 43.87
- 6) ในการทดลองประสิทธิภาพคอลัมน์จำลอง พบว่าตัวดูดซับทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ จุดหมดสภาพที่ความลึก 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 244.6 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 60 เซนติเมตรอยู่ที่ 297.2 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 345.8 BV ส่วนทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ จุดหมดสภาพที่ความลึก 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 248.8 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 60 เซนติเมตรอยู่ที่ 292.3 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 90 เซนติเมตรอยู่ที่ 340.3 BV
- 7) ในการทดลองการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ 5 รอบการทำงาน พบว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันมีค่าอยู่ระหว่าง 60-72 ชั่วโมง ซึ่งลดลงจากเดิมก่อนที่ฟื้นฟูสภาพคือ 118 ชั่วโมง

ซึ่งทราบจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ดังนั้นทำให้สามารถใช้ทดแทนกันได้ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่เกิดขึ้นโดยการนำกลับมาใช้ใหม่

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

- 1) ทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่น หรือในกรณีที่มีโลหะหนักหลายๆชนิดอยู่ด้วยกัน
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานของสารละลายฟีนฟูสภาพที่เป็นกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพของคอลัมน์เมื่อต่ออนุกรม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2534. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้อิออนแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อย และผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: เรือนแก้วการพิมพ์.
- ไชยวัฒน์ รงค์สยามานนท์. 2548. การปรับปรุงเม็ดซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ่านลอยลิกไนท์เพื่อการกำจัดแคดเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นคร ศรีวิวงศ์. 2549. การกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ในสารละลายโดยใช้เหล็กออกไซด์จากสเกลเหล็กโรงงานผลิตเหล็กรีดร้อนเป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธिया ชนะศักดิ์. 2542. การดูดซับของฟอสเฟตบนถ่านกัมมันต์เคลือบผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. 2547. การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- บรรเจิด แสงจันทร์, กอบสิน ทวีสิน และ นุชธนา พูลทอง. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทรายหล่อแต่ละ
 แห่งในประเทศไทย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 24 (มกราคม-เมษายน 2544) : 57-68
- พงศ์ภัทร ศรีขจร. 2549. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม (VI) ด้วย
 ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรม
 สิ่งแวดล้อม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรรณราย รุญเจริญ. 2545. การกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นสารดูดซับ.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปา เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร :
 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่
 ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.diw.go.th/edit_web_de
 sign/html/versionthai/laws/27.pdf](http://www.diw.go.th/edit_web_de

 sign/html/versionthai/laws/27.pdf) [2549, เมษายน 27]
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2544. รวมกฎหมายสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ปฏิบัติ.
 พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์.
- สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. 2528. ฟลูอิดเซชัน กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุวัจน์ ธีญรส. 2549. มลพิษทางทะเลและชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2525. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและ
 ชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง
 ประเทศไทย.

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials. 2006. Standard practice for : Determination of adsorptive Capacity of activated carbon by aqueous phase isotherm technique. D3860-98 Annual Book of ASTM Standard. Vol. 15.01. U.S.A. : 886-888.

American Society for Testing and Materials. 2006. Standard test method for : Cadmium in Water. D 3557-02. Annual Book of ASTM Standard. Vol. 11.01. U.S.A. : Baltimore.

American Society for Testing and Materials. 2006. Standard test method for : Advanced Ceramic Specific surface area by Physical Adsorption. C1274-00. Annual Book of ASTM Standard. Vol. 15.01. U.S.A. : 342-345.

Bailay S.E., Olin T.J., Brica R.M. and Adrian D.D.. 1999. A Review of the potentially low cost sorbents for heavy metals. Water Research. 33 : 2469-2479.

Benjamin M.M., Sletten R.S., Bailey R.P. and Bennett T. 1996 Sorption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand. Water Research. 30: 2609-2620.

Brown P.A., Gill S.A. and Allen S.J. 2000. Metal removal from waste water using peat. Water Research. 34 : 3907-3916.

Boily J.F., Sjoberg S. and Persson P. 2004. Structures and stabilities of Cd(II) and Cd(II)-phthalate complexes at the goethite/water interface, Geochimica et Cosmochimica Acta 69 : 3219-3235.

Boujelben N., Bouzid J., Elouear Z., Feki M., Jamoussi F. and Montiel A . 2008. Phosphorus removal from aqueous solution using iron coated natural and engineered sorbents, Journal of Hazardous Materials 151: 103 -110.

Chang Y.Y., Song k.H. and Yang J.k. 2008. Removal of AS (III) in a column reactor packed with iron-coated sand and manganese-coated sand. Journal of Hazardous Materials 150 : 565-572.

- Dzombak D.A. and Moral F. M., 1990. Surface Complexation Modeling. Singapore. A wiley-Interscience publication.
- Eckenfelder W.W. 1981. International Application of Adsorption to Wastewater Treatment Conference . New York : Environmental Press Inc.
- Eckenfelder W.W. 1989. Industrial Water Pollution Control. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Inc.
- Faust,S.D. and Aly O.M. 1987. Adsorption Processes for Water Treatment. United States of America: Butterworths Publishers.
- Faust,S.D. and Aly O.M. 1998. Chemistry of Water Treatment. 2nd ed. United States of America : Ann Arbor Press,Inc.
- Fergusson J.E. 1990. The Heavy elements-chemistry,environmental impact and health effects. Oxford : Pergamon Press.
- Forstner U. and Wittmann G.T.W. 1984 Metal Pollution in the Aquatic Environment. Berlin.Springer-Verlang.
- Koretsky C. 2000. The significance of surface complexation reactions in hydrologic system: a geochemistry's perspective. Journal of hydrology. 230: 127 – 171.
- Lai. C.H., Chen C.Y., Wei B.L. and Yeh S.H. 2002. Cadmium adsorption on goethite-coated sand in the presence of humic acid. Water research 36: 4943-4950.
- Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse . Singapore : McGraw-Hill.
- O'Neill, P. 1993. Environmental chemistry. 2nd ed. London : Chapman & Hall.
- Ramos R.L., Mendez J.R., Barron J.M., Rubio L.F. and Coronado R.M. 1997. Adsorption of Cadmium (II) from aqueous solution on to activated carbon. Water Science

Technology. 35 : 205-211.

Reynolds T.D. and Richards P.A., 1982. Unit operations and processes in environmental engineering. Boston. Pws publishing company.

Valoon, G.w. and Duffy S.J. 2000 . Environmental chemistry : a globe perspective.
New York: Oxford University Press.

Sundstrom, D.W. and Klei H. E.. 1979. Wastewater Treatment. United States of
American : Prentice-Hall In.

Zhao X., Holl W. H. and Yun G. 2002. Elimination of cadmium trace contaminations
from drinking water. Water Research. 36:851-858.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

วิธีทดสอบและผลการทดสอบ การชะละลาย และการย่อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ก-1 วิธีทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์หลุมฝังกลบ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถบดได้ จะต้องนำไปร่อน หรือไปบดเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ก่อนนำไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) หากมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (มก./ล.) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แสดงถึงของเสียที่ไม่เป็นอันตราย วิธี Waste Extraction Test (WET) มีขั้นตอนดังนี้

1. น้ำสกัดให้ใช้สารละลาย 0.2 โมลาร์ โซเดียมซัลเฟต ที่มีพีเอช 5.0 ± 0.1 โดยเตรียมจากการนำสารละลายกรดซัลฟิวริก ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 โมลาร์
2. สารละลายกรดซัลฟิวริก สามารถเตรียมได้โดยนำเอากรดซัลฟิวริกไปละลายใน น้ำกลั่น(deionized water)
3. นำตัวอย่าง 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลี เอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ในการสกัดควรผ่านการล้าง (rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลายกรดไนตริก ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร)

4. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ เทเบิลเชคเกอร์ (table shaker) หรือ โอเวอร์เฮด สเตอร์เรอ (overhead stirrer) หรือ โรตารี เอ็กซ์แทรกเตอร์ (rotary extractor) ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

5. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจไปปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอนโดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดเล็กอาจต้องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง 10,000 x G ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

6. ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างการสกัดให้อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส

7. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 5. ผสมกับกรดไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)

8. นำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้นด้วยเครื่อง ICP

ก-2 วิธีทดสอบการย่อย Acid Digestion US EPA SW-846 Method 3050B

1. ผสมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. ชั่งตัวอย่างมา 1-2 กรัม จดน้ำหนักที่ชั่งไว้ด้วยทศนิยมสี่ตำแหน่ง
3. เติม กรดไนตริก HNO_3 1:1 ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ต้มประมาณ 10 นาที

4. หลังจากนั้นจึงเติมกรดไนตริกเข้มข้น conc. HNO₃ 5 มิลลิลิตร ต้มต่อประมาณ 30 นาที จนกระทั่งเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ H₂O₂ 30% 3 มิลลิลิตร ต้มต่อไปและเติม H₂O₂ 1 มิลลิลิตร จนกระทั่งฟองปริมาณลดลง
6. จนกระทั่งปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร
7. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอนโดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
8. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 7. ลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 7. ผสมกับกรดไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)
9. นำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้นด้วยเครื่อง ICP-MS หรือ GFAA

ตารางที่ ก-3 แสดงผลการวิเคราะห์ทรายหลังจากผ่านการดูดซับแล้วที่แคดเมียม 3 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชนิด	Analyses	Method*	Unit	Results	Standard**
ทรายจากเตาฟลูอิด ไดซ์เบดเคลือบเหล็ก ออกไซด์	Cd	Acid Digestion-ICP	mg/kg	96.14	100
ทรายธรรมชาติ เคลือบเหล็กออกไซด์	Cd	Acid Digestion-ICP	mg/kg	111.85	100

ชนิด	Analyses	Method*	Unit	Results	Standard**
ทรายจากเตาฟลูอิด ไดซ์เบดเคลือบเหล็ก ออกไซด์	Cd	Leachate-ICP	mg/l	127	1.0
ทรายธรรมชาติเคลือบ เหล็กออกไซด์	Cd	Leachate-ICP	mg/l	52.3	1.0

ตารางที่ ก-4 แสดงผลการวิเคราะห์ทรายหลังจากผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

ชนิด	Analyses	Method*	Unit	Results	Standard**
ทรายจากเตาฟลูอิด ไดซ์เบดเคลือบเหล็ก ออกไซด์	Cd	Acid Digestion-ICP	mg/kg	37.2	100
ทรายธรรมชาติ เคลือบเหล็กออกไซด์	Cd	Acid Digestion-ICP	mg/kg	39.05	100

ชนิด	Analyses	Method*	Unit	Results	Standard**
ทรายจากเตาฟลูอิด ไดซ์เบดเคลือบเหล็ก	Cd	Leachate-ICP	mg/l	12.06	1.0

ออกไซด์					
ทรายธรรมชาติ เคลือบเหล็กออกไซด์	Cd	Leachate-ICP	mg/l	10.08	1.0

*method : วิธีทดสอบตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว (พ.ศ.2548) และ US EPA SW-846

**Standard : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



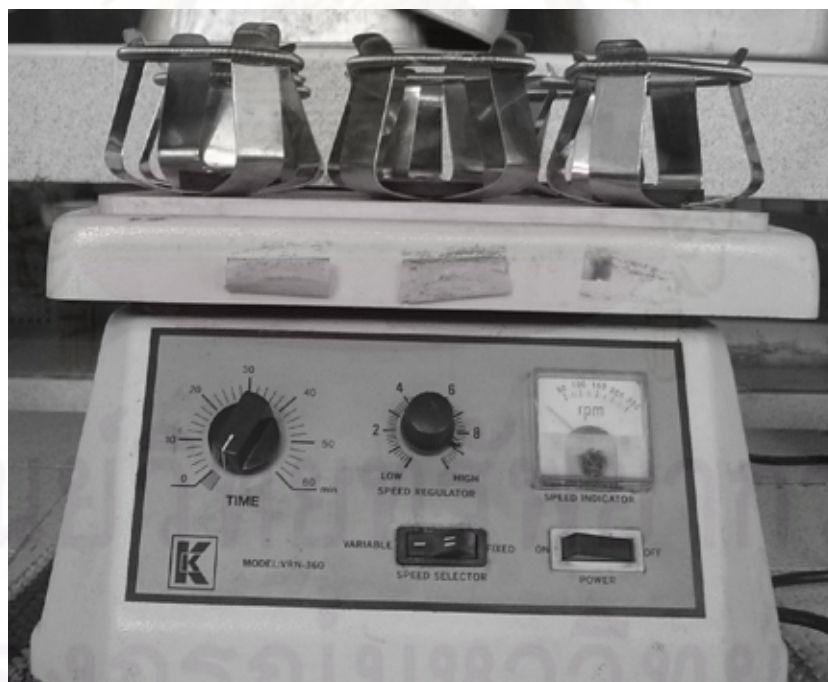
ภาคผนวก ข

ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



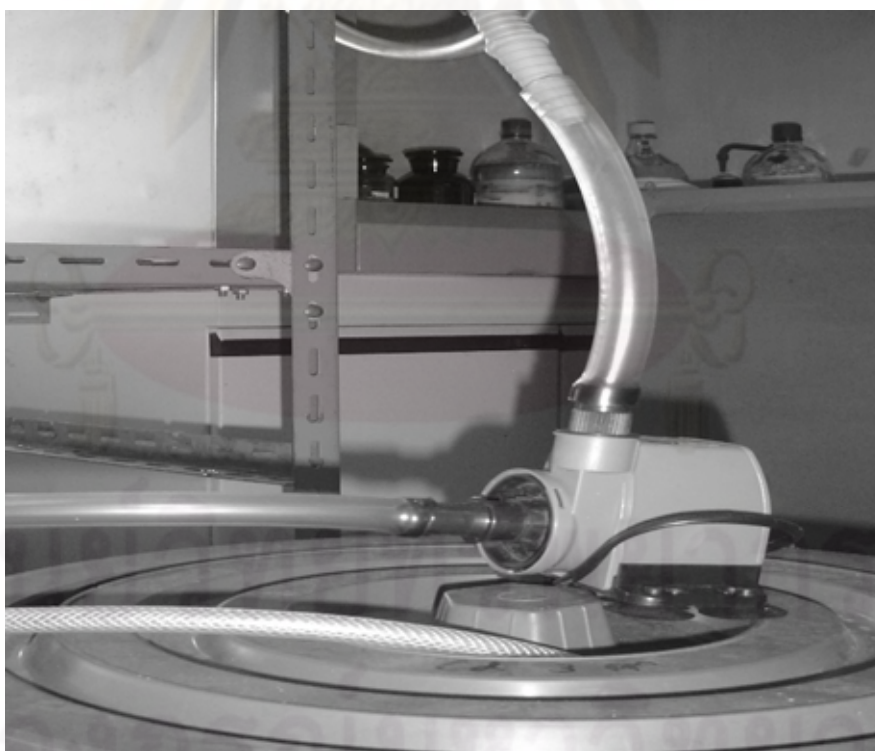
ภาชนะสำหรับเตรียมตัวกลางดูดซับ เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว



เครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วรอบได้



อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล



ปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลอง



อุปกรณ์ชุดคอลัมน์ดูดซับ

ศูนย์วิทยาศาสตร์การ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

บันทึกข้อมูลผลการทดลองระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์
เบด เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 9.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียม ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	9.05	8.40	1.0162	2.423	18.14
	2	9.01	8.65	1.0084	1.353	54.29
	4	9.04	8.96	1.0091	0.321	89.16
	6	9.04	8.57	1.0035	0.467	84.22
	8	9.05	8.44	1.0079	0.410	86.15
	10	9.08	8.44	1.0164	0.300	89.86
	12	9.05	8.72	1.0112	0.523	82.33
	24	9.07	8.23	1.0593	0.850	71.28
2	1	9.05	8.40	1.0035	2.343	20.84
	2	9.01	8.65	1.0103	1.221	58.75
	4	9.04	8.96	1.0035	0.433	85.37
	6	9.04	8.57	1.0041	0.424	85.68
	8	9.05	8.44	1.0130	0.380	87.16
	10	9.08	8.44	1.0104	0.331	88.82
	12	9.05	8.72	1.0015	0.556	81.22
	24	9.07	8.23	1.0059	0.661	77.67
3	1	9.05	9.40	1.0221	1.804	39.05
	2	9.01	8.65	1.0040	1.154	61.01
	4	9.08	8.58	1.0082	0.253	91.45
	6	9.05	8.44	1.0091	0.459	84.49
	8	9.05	8.44	1.0098	0.456	84.59
	10	9.08	8.44	1.0094	0.389	86.86

	12	9.05	8.72	1.0229	0.512	82.70
	24	9.07	8.23	1.0065	0.665	77.53
เฉลี่ย	1	2.1900				26.01
	2	1.2427				58.02
	4	0.3357				88.66
	6	0.4500				84.80
	8	0.4153				85.97
	10	0.3400				88.51
	12	0.5303				82.08
	24	0.7253				75.50

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบ
เหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 9.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH	pH	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียมที่	ประสิทธิภาพ (%)
		ก่อน	หลัง		เหลือ (มก./ล.)	
1	1	9.05	8.80	1.0234	1.276	56.89
	2	9.01	8.56	1.0166	0.868	70.68
	4	9.04	8.80	1.0080	0.326	88.99
	6	9.04	8.50	1.0101	0.406	86.28
	8	9.05	8.43	1.0083	0.386	86.96
	10	9.08	8.75	1.0258	0.510	82.77
	12	9.05	8.40	1.0139	0.456	84.59
	24	9.07	8.22	1.0121	0.687	76.79

2	1	9.05	8.80	1.0575	1.234	58.31
	2	9.01	8.56	1.0000	0.874	70.47
	4	9.04	8.80	1.0080	0.321	89.16
	6	9.04	8.50	1.0098	0.507	82.87
	8	9.05	8.43	1.0084	0.387	86.93
	10	9.08	8.75	1.0029	0.507	82.87
	12	9.05	8.40	1.0004	0.383	87.06
	24	9.07	8.22	1.0100	0.420	85.81
3	1	9.05	8.80	1.0028	0.543	81.66
	2	9.01	8.56	1.0081	0.908	69.32
	4	9.8	8.46	1.0434	0.322	89.12
	6	9.05	8.40	1.0117	0.402	86.42
	8	9.05	8.43	1.0089	0.396	86.62
	10	9.08	8.75	1.0046	0.427	85.57
	12	9.05	8.40	1.0012	0.440	85.14
	24	9.07	8.22	1.0194	0.506	82.91
เฉลี่ย	1	1.0177				65.62
	2	0.8833				70.16
	4	0.3230				89.09
	6	0.4383				85.19
	8	0.3897				86.84
	10	0.4813				83.74
	12	0.4263				85.60
	24	0.5377				81.84

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์
 เบด ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 9.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH	pH	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียมที่ เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
		ก่อน	หลัง			
1	1	9.05	9.01	1.0162	2.523	14.76
	2	9.01	8.65	1.0084	1.853	37.40
	4	9.04	8.96	1.0091	1.382	53.31
	6	9.04	8.97	1.0035	1.467	50.44
	8	9.05	9.02	1.0079	1.381	53.34
	10	9.08	9.05	1.0164	1.312	55.68
	12	9.05	8.82	1.0112	1.323	55.30
	24	9.07	8.73	1.0593	1.152	61.08
2	1	9.05	8.99	1.0035	2.543	14.09
	2	9.01	9.02	1.0103	1.821	38.48
	4	9.04	8.96	1.0035	1.333	54.97
	6	9.04	9.07	1.0041	1.204	59.32
	8	9.05	9.04	1.0130	1.383	53.28
	10	9.08	8.94	1.0104	1.231	58.41
	12	9.05	8.72	1.0015	1.45	51.01
	24	9.07	8.93	1.0059	1.361	54.02
3	1	9.05	9.04	1.0221	2.104	28.92
	2	9.01	8.95	1.0040	1.754	40.74
	4	9.08	9.03	1.0082	1.353	54.29
	6	9.05	9.03	1.0091	1.499	49.36
	8	9.05	8.89	1.0098	1.396	52.84

	10	9.08	9.04	1.0094	1.309	55.78
	12	9.05	8.72	1.0229	1.312	55.68
	24	9.07	9.03	1.0065	1.226	58.58
เฉลี่ย	1	2.3900				19.26
	2	1.8093				38.87
	4	1.3560				54.19
	6	1.3900				53.04
	8	1.3867				53.15
	10	1.2840				56.62
	12	1.3617				54.00
	24	1.2463				57.89

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 9.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH	pH	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียมที่ เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
		ก่อน	หลัง			
1	1	9.05	9.02	1.0234	2.306	22.09
	2	9.01	8.56	1.0166	1.828	38.24
	4	9.04	8.98	1.0080	1.316	55.54
	6	9.04	8.96	1.0101	1.289	56.45
	8	9.05	9.03	1.0083	1.286	56.55
	10	9.08	9.03	1.0258	1.391	53.01
	12	9.05	8.89	1.0139	1.395	52.87
	24	9.07	8.72	1.0121	1.487	49.76
2	1	9.05	8.98	1.0575	2.196	25.81

	2	9.01	9.01	1.0043	1.824	38.38
	4	9.04	8.97	1.0080	1.321	55.37
	6	9.04	8.50	1.0098	1.297	56.18
	8	9.05	9.03	1.0084	1.387	53.14
	10	9.08	8.95	1.0029	1.309	55.78
	12	9.05	8.84	1.0004	1.383	53.28
	24	9.07	8.94	1.0100	1.242	58.04
3	1	9.05	9.04	1.0028	2.093	29.29
	2	9.01	8.86	1.0081	1.808	38.92
	4	9.08	9.06	1.0434	1.382	53.31
	6	9.05	9.04	1.0117	1.365	53.89
	8	9.05	8.84	1.0089	1.379	53.41
	10	9.08	9.05	1.0046	1.292	56.35
	12	9.05	8.84	1.0012	1.394	52.91
	24	9.07	9.02	1.0194	1.296	56.22
เฉลี่ย	1	2.1983				25.73
	2	1.8200				38.51
	4	1.3397				54.74
	6	1.3170				55.51
	8	1.3507				54.37
	10	1.3307				55.05
	12	1.3907				53.02
	24	1.3417				54.67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

บันทึกข้อมูลผลการทดลอง พิเศษ ความเข้มข้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

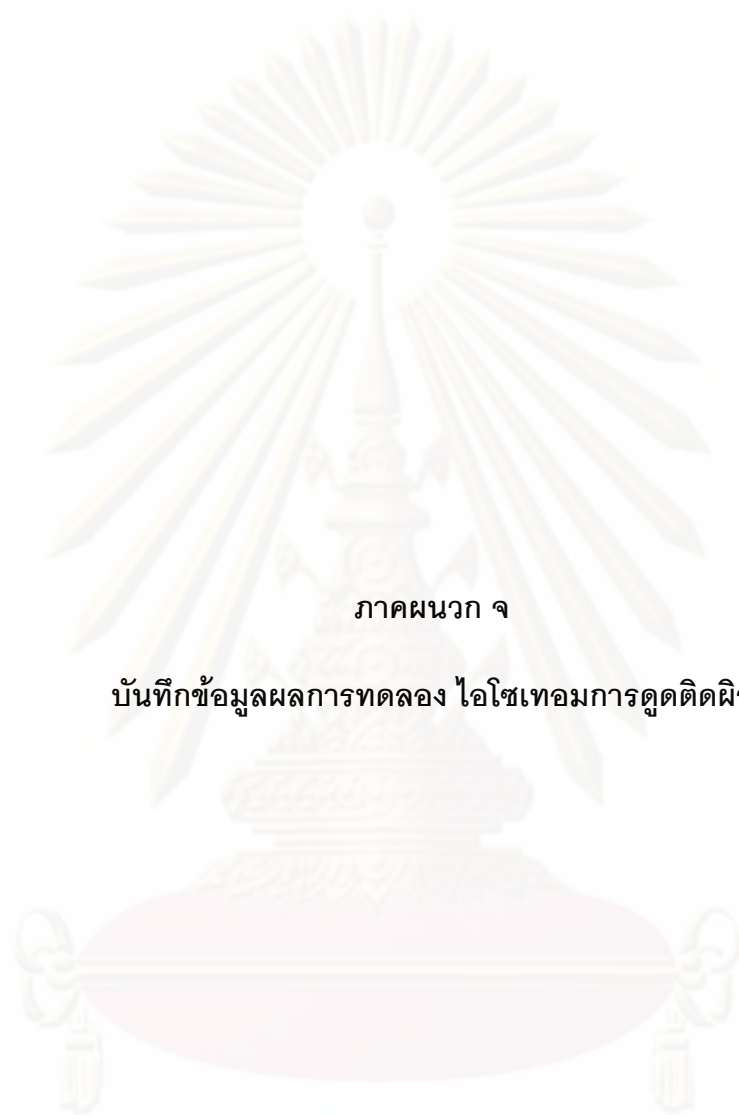
ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 4 ชั่วโมง

ชนิด	พีเอช เริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย	
		น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียม ที่เหลือ (มก./ล.)	pH สุดท้าย	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียม ที่เหลือ (มก./ล.)	pH สุดท้าย	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียม ที่เหลือ (มก./ล.)	pH สุดท้าย	แคดเมียม ที่เหลือ (มก./ล.)	(%)
ฟลูอิด ไดซ์ เบด เคลือบ เล็ก ออกไซด์	5.04	1.0041	2.000	7.42	1.0197	1.974	7.42	1.0231	1.843	7.63	1.9390	31.48
	6.06	1.0340	1.844	7.28	1.0626	1.715	7.28	1.0042	2.002	7.52	1.8537	30.05
	7.11	1.0403	0.749	7.36	1.0102	0.853	7.36	1.0052	0.861	7.34	0.8210	67.80
	8.02	1.0083	0.506	7.64	1.0167	0.565	7.64	1.0022	0.520	7.72	0.5303	76.22
	9.03	1.0274	0.499	8.07	1.0087	0.42	8.07	1.0035	0.455	7.98	0.4580	77.59
	10.13	1.0558	0.177	8.23	1.0576	0.107	8.23	1.0021	0.194	8.21	0.1593	92.03
ฟลูอิด ไดซ์ เบด	5.04	1.0036	1.914	7.85	1.0083	1.938	7.89	1.0084	1.923	7.62	1.9250	3.65
	6.06	1.0061	1.803	7.53	1.0042	1.805	7.53	1.0262	1.812	7.51	1.8090	9.46
	7.11	1.0098	0.982	7.63	1.0086	0.975	7.36	1.0074	0.985	7.37	0.9842	50.74
	8.02	1.0026	0.973	7.90	1.0083	0.965	8.21	1.0084	0.976	7.52	0.9740	51.25
	9.03	1.0086	0.982	8.08	1.0047	0.983	8.65	1.0084	0.974	8.54	0.9824	50.83

	10.13	1.0056	0.576	8.08	1.0083	0.583	8.83	1.0083	0.582	8.66	0.5812	70.91
ทราย ธรรมชาติ	5.04	1.0071	1.959	7.98	1.0042	1.945	7.83	1.0063	1.930	7.65	1.9446	2.67
	6.06	1.0086	1.885	7.12	1.0063	1.876	7.51	1.0056	1.882	7.99	1.8860	5.61
	7.11	1.0094	0.978	7.32	1.0231	0.973	7.63	1.0332	0.986	7.33	0.9762	51.14
	8.02	1.0310	0.967	8.43	1.0375	0.956	7.81	1.0854	0.965	8.94	0.9634	51.78
	9.03	1.0047	0.967	8.42	1.0031	0.964	8.34	1.0082	0.971	8.53	0.9647	51.72
	10.13	1.0082	0.547	8.61	1.0085	0.562	8.92	1.0043	0.536	8.19	0.5420	72.87
ธรรมชาติ เคลือบ เหล็ก ออกไซด์	5.04	1.0269	2.008	7.94	1.0155	1.998	7.94	1.0042	1.898	7.65	1.9680	30.46
	6.06	1.0456	2.068	7.36	1.0012	1.905	7.36	1.0026	1.822	7.38	1.9317	27.11
	7.11	1.0002	0.815	7.47	1.0096	1.045	7.47	1.0052	0.955	7.42	0.9383	63.20
	8.02	1.0028	0.533	7.80	1.0119	0.544	7.80	1.0048	0.522	7.82	0.5330	76.10
	9.03	1.0135	0.452	8.04	1.0019	0.411	8.04	1.0052	0.410	7.42	0.4243	79.24
	10.13	1.0004	0.089	8.26	1.0032	0.103	8.21	1.0064	0.092	8.28	0.0947	95.26

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 4 ชั่วโมง พีเอชเป็นกลาง

ชนิด	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย	
		น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	pH สุดท้าย	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	pH สุดท้าย	น้ำหนัก (กรัม)	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	pH สุดท้าย	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	(%)
ฟลูอิดไดซ์ เบดเคลือบเล็ก ออกไซด์	2.857	1.0061	0.317	7.42	1.0092	0.327	7.42	1.0101	0.238	7.63	0.2940	89.71
	6.932	1.0032	3.061	7.28	1.0016	2.957	7.28	1.0042	3.172	7.52	3.0633	55.81
	9.756	1.0403	5.631	7.36	1.0102	5.847	7.36	1.0056	5.915	7.34	5.7977	40.57
ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็ก ออกไซด์	2.857	1.0076	0.284	7.85	1.0083	0.325	7.89	1.0084	0.381	7.62	0.3300	88.45
	6.932	1.0061	3.186	7.53	1.0062	4.162	7.53	1.0062	3.082	7.51	3.4767	49.85
	9.756	1.0014	6.385	7.63	1.0088	6.321	7.36	1.0078	6.284	7.37	6.3300	35.12



ภาคผนวก จ

บันทึกข้อมูลผลการทดลอง ไซโซเทอมการดูดตีตผิว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 แสดงผลความเข้มข้นที่เหลือในการทดลองหาไอโซโทมการดูดซับของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.948 มิลลิกรัมต่อลิตร

ครั้งที่	ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์ เบดเคลือบเหล็กออกไซด์		ครั้งที่	ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์	
	m(g)	Ce (mg/l)		m(g)	Ce (mg/l)
1	0.2008	2.104	1	0.2018	1.914
	0.5024	1.256		0.5084	0.861
	0.7007	0.598		0.7044	0.658
	1.0010	0.328		1.0015	0.492
	1.5095	0.203		1.5028	0.216
	2.0137	0.096		2.0045	0.164
2	0.2069	1.924	2	0.2030	1.912
	0.5034	1.223		0.5130	0.928
	0.7054	0.591		0.7088	0.654
	1.0066	0.311		1.0021	0.413
	1.5007	0.212		1.5054	0.224
	2.0155	0.121		2.0119	0.109
3	0.2003	1.845	3	0.2012	2.302
	0.5024	1.153		0.5032	0.827
	0.7001	0.512		0.7001	0.656
	1.0140	0.214		1.0012	0.409
	1.5001	0.219		1.5102	0.208
	2.0023	0.159		2.0121	0.142
เฉลี่ย	0.2027	1.958	เฉลี่ย	0.2020	2.043
	0.5027	1.211		0.5082	0.872
	0.7021	0.567		0.7044	0.656

	1.0072	0.284			1.0016	0.438
	1.5034	0.211			1.5061	0.216
	2.0105	0.125			2.0095	0.138

ตารางที่ จ-2 แสดงผลการทดสอบการดูดซับแคดเมียมบนตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.948 มิลลิกรัมต่อลิตร

Co	x	m	x/m	Ce	1/Ce	1/(x/m)
ความ เข้มข้น แคดเมียม เริ่มต้น (mg/l)		ปริมาณ สารดูดซับ (มก./50 มล.น้ำ ตัวอย่าง)	(mg/g)	ความ เข้มข้น แคดเมียม ที่เหลือ		
2.948	0.990	0.00405	0.24	1.958	0.511	4.0929
2.948	1.737	0.01005	0.17	1.211	0.826	5.7874
2.948	2.381	0.01404	0.17	0.567	1.764	5.8972
2.948	2.664	0.02014	0.13	0.284	3.517	7.5625
2.948	2.737	0.03007	0.09	0.211	4.732	10.9873
2.948	2.823	0.04021	0.07	0.125	7.979	14.2454

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-2 แสดงผลการทดสอบการดูดซับแคดเมียมบนตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.948 มิลลิกรัมต่อลิตร

Co	x	m	x/m	Ce	1/Ce	1/(x/m)
ความ เข้มข้น แคดเมียม เริ่มต้น (mg/l)		ปริมาณ สารดูดซับ (มก./50 มล.น้ำ ตัวอย่าง		ความ เข้มข้น แคดเมียม ที่เหลือ		
2.948	0.905	0.004	0.2241	2.043	0.4896	4.4624
2.948	2.076	0.010	0.2043	0.872	1.1468	4.8960
2.948	2.292	0.014	0.1627	0.656	1.5244	6.1469
2.948	2.510	0.020	0.1253	0.438	2.2831	7.9809
2.948	2.732	0.030	0.0907	0.216	4.6296	11.0259
2.948	2.810	0.040	0.0699	0.138	7.2289	14.3042

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

บันทึกข้อมูลผลการทดลอง คอลัมน์ดูดซับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-1 แสดงผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ
เหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 90
เซนติเมตร

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ มิลลิลิตร	ความ เข้มข้นขา เข้า (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความ เข้มข้นขา ออก (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	C/C_0	pH สุดท้าย	อัตราการ ไหล ml/min
2	2820	2.706	N.D.	0.0018	9.63	23.5
4	5820	2.706	N.D.	0.0018	9.53	25
6	8700	2.706	N.D.	0.0026	9.55	24
20	29700	2.706	N.D.	0.0081	9.10	25
22	32820	2.706	N.D.	0.0103	9.39	26
26	39060	2.706	N.D.	0.0207	9.45	26
30	45180	2.706	N.D.	0.0248	9.09	25.5
44	67020	2.706	N.D.	0.0318	9.02	26
50	76020	2.706	0.103	0.0381	8.33	25
54	82140	2.706	0.317	0.1171	8.12	25.5
58	88380	2.706	0.563	0.2081	8.42	26
72	109800	2.706	1.053	0.3891	9.04	25.5
76	115920	2.706	1.082	0.3999	8.85	25.5

78	118920	2.706	1.274	0.4708	8.66	25
80	121920	2.706	1.443	0.5333	8.67	25
94	142500	2.706	1.564	0.5780	8.79	24.5
98	148740	2.706	1.813	0.6700	8.76	26
100	151920	2.706	1.846	0.6822	8.44	26.5
104	157920	2.706	2.002	0.7398	8.55	25
118	179760	2.706	2.124	0.7849	8.67	26
120	182760	2.706	2.323	0.8585	8.79	25
122	185880	2.706	2.418	0.8936	8.73	26
124	188820	2.706	2.404	0.8884	8.76	24.5
126	191640	2.706	2.563	0.9472	8.44	23.5
130	197280	2.706	2.645	0.9775	8.67	23.5
142	213840	2.706	2.678	0.9897	8.76	23
144	216540	2.706	2.648	0.9786	8.44	22.5
150	224460	2.706	2.653	0.9804	8.67	22

หมายเหตุ

ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ จ-2 แสดงผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทราเยอร์ธรรมชาติเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์ มิลลิเมตร	ความเข้มข้นขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/C ₀	pH สุดท้าย	อัตราการไหล ml/min
2	3000	2.706	N.D.	0.0030	8.36	25
4	5940	2.706	N.D.	0.0026	9.14	24.5
6	9060	2.706	N.D.	0.0033	8.91	26
20	30480	2.706	N.D.	0.0044	8.65	25.5
22	33600	2.706	N.D.	0.0096	8.72	26
26	39840	2.706	N.D.	0.0159	8.89	26
30	45960	2.706	N.D.	0.0281	8.68	25.5
44	65700	2.706	N.D.	0.0314	7.98	23.5
50	74448	2.706	0.112	0.0414	7.18	24.3
54	80568	2.706	0.342	0.1264	7.88	25.5
58	86568	2.706	0.563	0.2081	7.82	25
72	107988	2.706	0.987	0.3647	8.24	25.5
76	114228	2.706	1.112	0.4109	8.32	26

78	117228	2.706	1.203	0.4446	8.08	25
80	120228	2.706	1.313	0.4852	8.35	25
94	140808	2.706	1.675	0.6190	8.16	24.5
98	147168	2.706	1.789	0.6611	8.18	26.5
100	150288	2.706	1.897	0.7010	8.27	26
104	156168	2.706	2.204	0.8145	8.26	24.5
118	177168	2.706	2.276	0.8411	8.10	25
120	180108	2.706	2.367	0.8747	8.39	24.5
122	182988	2.706	2.426	0.8965	8.36	24
124	185808	2.706	2.414	0.8921	8.23	23.5
126	188568	2.706	2.521	0.9316	8.51	23
130	194088	2.706	2.674	0.9882	8.65	23
142	211008	2.706	2.692	0.9948	8.04	23.5
144	213708	2.706	2.684	0.9919	8.23	22.5
150	221628	2.706	2.664	0.9845	8.26	22

หมายเหตุ

ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of

detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ๓-3 แสดงผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ
เหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 60
เซนติเมตร

เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ มิลลิเมตร	ความ เข้มข้นขา เข้า (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความ เข้มข้นขา ออก (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	C/C ₀	pHสุดท้าย
2	2820	2.706	N.D.	0.0044	8.89
4	5820	2.706	N.D.	0.0052	9.64
6	8700	2.706	N.D.	0.0055	9.81
20	29700	2.706	N.D.	0.0144	9.18
22	32820	2.706	N.D.	0.0166	9.35
26	39060	2.706	0.136	0.0503	9.41
30	45180	2.706	0.597	0.2206	9.06
44	67020	2.706	0.986	0.3644	9.18
50	76020	2.706	1.156	0.4272	8.66
54	82140	2.706	1.667	0.6160	8.03
58	88380	2.706	2.153	0.7956	8.39
72	109800	2.706	2.456	0.9076	8.47
76	115920	2.706	2.525	0.9331	8.45
78	118920	2.706	2.645	0.9775	8.64
80	121920	2.706	2.556	0.9446	8.47
94	142500	2.706	2.641	0.9760	8.74

98	148740	2.706	2.651	0.9797	8.57
100	151920	2.706	2.531	0.9353	8.74
104	157920	2.706	2.675	0.9885	8.75
118	179760	2.706	2.543	0.9398	8.26
120	182760	2.706	2.674	0.9882	8.27
122	185880	2.706	2.643	0.9767	8.74
124	188820	2.706	2.674	0.9882	8.75
126	191640	2.706	2.648	0.9786	8.73
130	197280	2.706	2.691	0.9945	8.47
142	213840	2.706	2.689	0.9937	8.6
144	216540	2.706	2.675	0.9885	8.82
150	224460	2.706	2.701	0.9982	8.84

หมายเหตุ ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-4 แสดงผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 60 เซนติเมตร

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ มิลลิเมตร	ความเข้มข้นขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/C ₀	pHสุดท้าย
2	3000	2.706	N.D.	0.0041	8.43
4	5940	2.706	N.D.	0.0059	8.66
6	9060	2.706	N.D.	0.0067	8.98
20	30480	2.706	N.D.	0.0170	8.60
22	33600	2.706	N.D.	0.0214	8.72
26	39840	2.706	N.D.	0.0322	8.87
30	45960	2.706	0.126	0.0466	8.63
44	65700	2.706	0.867	0.3204	8.32
50	74448	2.706	1.467	0.5421	8.56
54	80568	2.706	1.864	0.6888	8.03
58	86568	2.706	2.286	0.8448	7.98
72	107988	2.706	2.462	0.9098	8.46
76	114228	2.706	2.594	0.9586	8.43
78	117228	2.706	2.574	0.9512	8.56
80	120228	2.706	2.676	0.9889	8.47
94	140808	2.706	2.516	0.9298	8.57
98	147168	2.706	2.457	0.9080	8.56

100	150288	2.706	2.654	0.9808	8.67
104	156168	2.706	2.564	0.9475	8.53
118	177168	2.706	2.684	0.9919	8.44
120	180108	2.706	2.658	0.9823	8.45
122	182988	2.706	2.652	0.9800	8.43
124	185808	2.706	2.674	0.9882	8.53
126	188568	2.706	2.684	0.9919	8.54
130	194088	2.706	2.568	0.9490	8.34
142	211008	2.706	2.587	0.9560	8.43
144	213708	2.706	2.659	0.9826	8.47
150	221628	2.706	2.674	0.9882	8.57

หมายเหตุ ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ๕-5 แสดงผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 30 เซนติเมตร

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ มิลลิลิตร	ความเข้มข้นขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/C ₀	pHสุดท้าย
-------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	------------------	-----------

2	2820	2.706	N.D.	0.0070	9.03
4	5820	2.706	N.D.	0.0089	9.47
6	8700	2.706	N.D.	0.0100	9.78
20	29700	2.706	0.268	0.0990	8.95
22	32820	2.706	0.682	0.2520	9.07
26	39060	2.706	1.787	0.6604	9.26
30	45180	2.706	2.456	0.9076	8.86
44	67020	2.706	2.572	0.9505	8.57
50	76020	2.706	2.413	0.8917	7.99
54	82140	2.706	2.527	0.9339	8.45
58	88380	2.706	2.597	0.9597	8.28
72	109800	2.706	2.608	0.9638	8.80
76	115920	2.706	2.625	0.9701	8.45
78	118920	2.706	2.651	0.9797	8.42
80	121920	2.706	2.658	0.9823	8.56
94	142500	2.706	2.674	0.9882	8.34
98	148740	2.706	2.674	0.9882	8.57
100	151920	2.706	2.684	0.9919	8.63
104	157920	2.706	2.702	0.9985	8.62
118	179760	2.706	2.674	0.9882	8.61

120	182760	2.706	2.684	0.9919	8.62
122	185880	2.706	2.686	0.9926	8.53
124	188820	2.706	2.674	0.9882	8.27
126	191640	2.706	2.681	0.9908	8.38
130	197280	2.706	2.642	0.9763	8.38
142	213840	2.706	2.561	0.9464	8.53
144	216540	2.706	2.585	0.9553	8.43
150	224460	2.706	2.701	0.9982	8.44

หมายเหตุ ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ๑-6 แสดงผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 30 เซนติเมตร

เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ มิลลิลิตร	ความ เข้มข้นขา เข้า (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความ เข้มข้นขา ออก (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	C/C ₀	pHสุดท้าย
--------------------------------------	---	---	--	------------------	-----------

2	3000	2.706	N.D.	0.0070	8.42
4	5940	2.706	N.D.	0.0067	8.66
6	9060	2.706	N.D.	0.0096	9.08
20	30480	2.706	N.D.	0.0218	8.60
22	33600	2.706	0.843	0.3115	8.72
26	39840	2.706	1.564	0.5780	8.74
30	45960	2.706	2.466	0.9113	8.47
44	65700	2.706	2.479	0.9161	8.17
50	74448	2.706	2.543	0.9398	8.02
54	80568	2.706	2.474	0.9143	7.98
58	86568	2.706	2.549	0.9420	7.93
72	107988	2.706	2.569	0.9494	8.37
76	114228	2.706	2.683	0.9915	8.23
78	117228	2.706	2.699	0.9974	8.31
80	120228	2.706	2.695	0.9959	8.35
94	140808	2.706	2.703	0.9989	8.41
98	147168	2.706	2.645	0.9775	8.42
100	150288	2.706	2.684	0.9919	8.34
104	156168	2.706	2.684	0.9919	8.54
118	177168	2.706	2.628	0.9712	8.62

120	180108	2.706	2.636	0.9741	8.51
122	182988	2.706	2.675	0.9885	8.52
124	185808	2.706	2.648	0.9786	8.43
126	188568	2.706	2.645	0.9775	8.51
130	194088	2.706	2.569	0.9494	8.42
142	211008	2.706	2.674	0.9882	8.51
144	213708	2.706	2.684	0.9919	8.45
150	221628	2.706	2.694	0.9956	8.41

หมายเหตุ ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (

limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช

บันทึกข้อมูลผลการทดลอง การฟื้นฟูสภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 แสดงผลความเข้มข้นที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำกราดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1

ทรายจากเตาฟลูอิดไดซเบดเคลือบเหล็กออกไซด์			ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์		
เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH
2	N.D.	6.85	2	N.D.	6.70
4	N.D.	7.11	4	N.D.	6.46
12	N.D.	6.47	12	N.D.	7.53
16	N.D.	6.59	16	N.D.	6.54
24	N.D.	7.59	24	N.D.	6.87
32	N.D.	7.14	32	N.D.	7.32
36	0.313	6.77	36	0.483	6.52
48	0.799	6.61	48	0.638	6.53
56	1.267	7.30	56	1.102	7.38
60	1.883	7.44	60	1.983	7.32
72	2.684	7.17	72	2.696	7.05
84	2.598	7.53	84	2.683	8.17
92	2.683	8.31	92	2.598	8.14
96	2.642	8.01	96	2.634	8.25
104	2.578	8.20	104	2.612	8.34

หมายเหตุ

ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ข-2 แสดงผลความเข้มข้นที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำกราดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2

ทรายจากเตาฟลูอิดไดซเบดเคลือบเหล็กออกไซด์			ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์		
เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH
2	N.D.	6.06	2	N.D.	7.23
4	N.D.	7.90	4	N.D.	6.62
12	N.D.	6.95	12	0.323	7.16
16	0.215	7.17	16	0.631	6.56
24	0.583	6.62	24	1.134	7.15
32	0.874	7.52	32	1.641	7.27
36	1.126	7.09	36	1.905	7.27
48	1.573	7.27	48	2.165	7.04
56	2.491	7.01	56	2.567	7.03
60	2.583	7.54	60	2.562	7.05
72	2.595	7.84	72	2.652	7.68
84	2.603	7.98	84	2.659	8.45
92	2.634	8.02	92	2.672	8.32
96	2.543	8.12	96	2.587	8.32
104	2.563	8.34	104	2.568	8.41

หมายเหตุ

ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ข-3 แสดงผลความเข้มข้นที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการ
ดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3

ทรายจากเตาฟลูอิดไดซเบดเคลือบเหล็กออกไซด์			ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์		
เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH
2	N.D.	7.45	2	N.D.	7.84
4	N.D.	7.24	4	N.D.	7.27
12	N.D.	7.83	12	N.D.	7.63
16	N.D.	7.84	16	N.D.	7.94
24	N.D.	6.93	24	0.096	7.36
32	0.826	7.31	32	0.932	7.83
36	1.293	7.41	36	1.375	7.83
48	2.245	7.46	48	2.149	7.64
56	2.484	7.85	56	2.398	7.61
60	2.584	6.98	60	2.548	7.94
72	2.653	7.82	72	2.674	8.03
84	2.567	7.84	84	2.674	8.32
92	2.578	8.23	92	2.569	8.03
96	2.567	8.41	96	2.568	8.21
104	2.587	8.31	104	2.578	8.24

หมายเหตุ

ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of
detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ข-4 แสดงผลความเข้มข้นที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการ
ดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 4

ทรายจากเตาฟลูอิดไดซเบดเคลือบเหล็กออกไซด์			ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์		
เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH
2	N.D.	6.45	2	N.D.	6.64
4	N.D.	6.65	4	N.D.	6.94
12	N.D.	7.43	12	N.D.	7.37
16	0.352	6.72	16	0.263	6.63
24	0.894	7.12	24	1.265	7.49
32	1.197	7.52	32	1.387	6.84
36	1.298	7.21	36	1.438	7.51
48	1.568	7.83	48	1.568	7.63
56	2.073	7.32	56	2.163	7.52
60	2.652	7.41	60	2.586	7.95
72	2.541	7.25	72	2.674	8.23
84	2.573	7.38	84	2.568	8.16
92	2.568	8.32	92	2.561	8.22
96	2.569	8.04	96	2.568	8.34
104	2.563	8.27	104	2.685	8.31

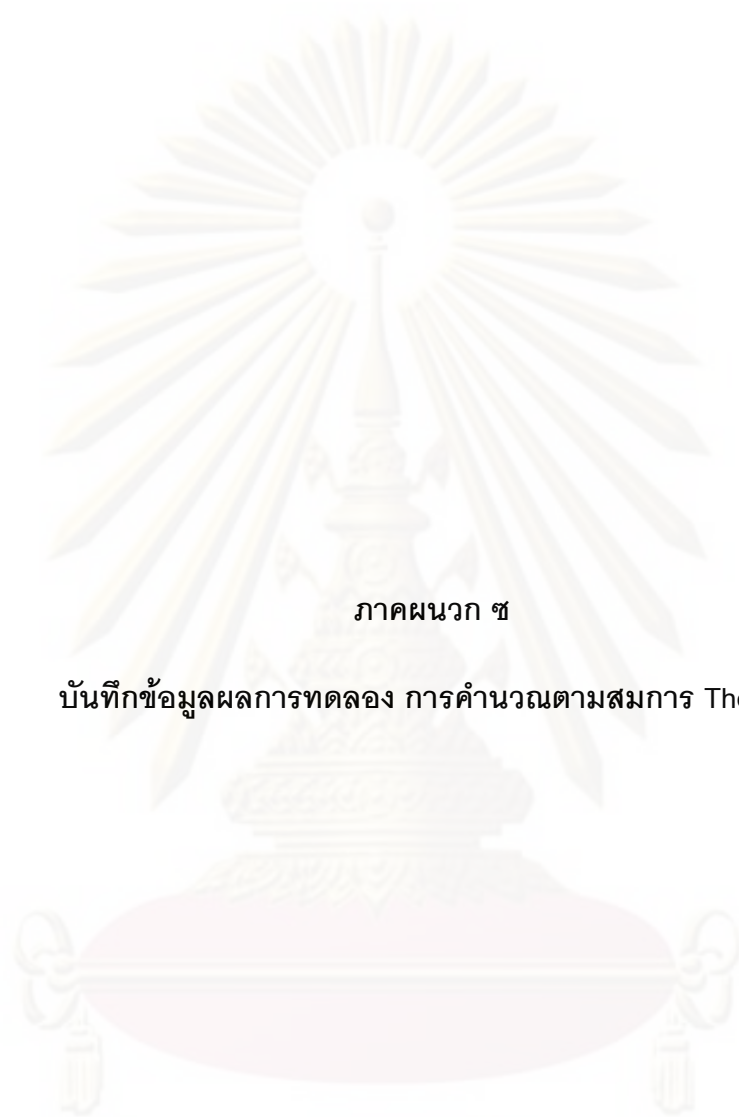
หมายเหตุ ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of
detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ข-5 แสดงผลความเข้มข้นที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการ
ดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5

ทรายจากเตาฟลูอิดไดซเบดเคลือบเหล็กออกไซด์			ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์		
เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH
2	N.D.	7.42	2	N.D.	7.63
4	0.125	7.58	4	0.223	7.51
12	0.563	7.25	12	0.870	7.23
16	0.896	7.64	16	1.237	7.46
24	1.526	7.28	24	1.763	7.93
32	1.863	7.83	32	2.168	7.65
36	2.079	7.51	36	2.269	7.33
48	2.298	7.93	48	2.283	7.54
56	2.423	7.62	56	2.411	7.71
60	2.562	7.44	60	2.396	7.82
72	2.563	7.98	72	2.684	7.94
84	2.579	7.42	84	2.674	7.09
92	2.678	8.16	92	2.673	7.06
96	2.698	8.42	96	2.567	8.21
104	2.642	8.42	104	2.568	8.05

หมายเหตุ

ความเข้มข้นน้อยสุดของสารละลายแคดเมียมที่สามารถวัดได้ (limit of
detection) = 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก ซ

บันทึกข้อมูลผลการทดลอง การคำนวณตามสมการ Thomas

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 แสดงผลการคำนวณคอลัมน์จุดตัดของตัวกลางทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ
เหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางจุดตัด 90
เซนติเมตร

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความ เข้มข้นขา เข้า (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความ เข้มข้นขา ออก (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	C_0/C		ปริมาณ น้ำที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	$\ln (C_0/C-1)$
				$(C_0/C)-1$		
2	2.706	0.005	541.2	540.2	2.82	6.2919
4	2.706	0.005	541.2	540.2	5.82	6.2919
6	2.706	0.007	386.6	385.5714	8.70	5.9547
20	2.706	0.022	123	122.0000	29.7	4.804
22	2.706	0.028	96.64	95.6429	32.82	4.5606
26	2.706	0.056	48.32	47.3214	39.06	3.8569
30	2.706	0.067	40.39	39.3881	45.18	3.6734
44	2.706	0.086	31.47	30.4651	67.02	3.4165
50	2.706	0.103	26.27	25.2718	76.02	3.2296
54	2.706	0.317	8.536	7.5363	82.14	2.0197
58	2.706	0.563	4.806	3.8064	88.38	1.3366
72	2.706	1.053	2.57	1.5698	109.8	0.4509
76	2.706	1.082	2.501	1.5009	115.92	0.406
78	2.706	1.274	2.124	1.1240	118.92	0.1168
80	2.706	1.443	1.875	0.8753	121.92	-0.1332
94	2.706	1.564	1.73	0.7302	142.5	-0.3144
98	2.706	1.813	1.493	0.4926	148.74	-0.708
100	2.706	1.846	1.466	0.4659	151.92	-0.7637

104	2.706	2.002	1.352	0.3516	157.92	-1.0452
118	2.706	2.460	1.100	0.1	179.76	-2.3025
120	2.706	2.523	1.073	0.0725	182.76	-2.624
122	2.706	2.618	1.034	0.0336	185.88	-3.3932
124	2.706	2.654	1.02	0.0196	188.82	-1.6296
126	2.706	2.563	1.056	0.0558	191.64	-2.8859
130	2.706	2.645	1.023	0.0231	197.28	-3.767
142	2.706	2.678	1.01	0.0105	213.84	-4.556
144	2.706	2.648	1.022	0.0219	216.54	-3.8212
150	2.706	2.653	1.02	0.0200	224.46	-1.609

ตารางที่ ซ-2 แสดงผลการคำนวณคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเบดเคลือบเหล็ก ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 2.706 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ 90 เซนติเมตร

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ความ เข้มข้นขา เข้า (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความ เข้มข้นขา ออก (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	C_0/C	ปริมาณ น้ำที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	$(C_0/C)-1$	$\ln (C_0/C-1)$
2	2.706	0.008	338.3	3.00	337.25	5.8208
4	2.706	0.007	386.6	5.94	385.5714	5.9547
6	2.706	0.009	300.7	9.06	299.6667	5.7026
20	2.706	0.012	225.5	30.48	224.5	5.4138
22	2.706	0.026	104.1	33.6	103.0769	4.6354
26	2.706	0.043	62.93	39.84	61.9302	4.126

30	2.706	0.076	35.61	45.96	34.6053	3.544
44	2.706	0.085	31.84	65.7	30.8353	3.4286
50	2.706	0.112	24.16	74.448	23.1607	3.1424
54	2.706	0.342	7.912	80.568	6.9123	1.9333
58	2.706	0.563	4.806	86.568	3.8064	1.3366
72	2.706	0.987	2.742	107.988	1.7416	0.5548
76	2.706	1.112	2.433	114.228	1.4335	0.3601
78	2.706	1.203	2.249	117.228	1.2494	0.2226
80	2.706	1.313	2.061	120.228	1.0609	5.9112
94	2.706	1.675	1.616	140.808	0.6155	-0.4853
98	2.706	1.789	1.513	147.168	0.5126	-0.6682
100	2.706	1.897	1.426	150.288	0.4265	-0.8521
104	2.706	2.204	1.228	156.168	0.2278	-1.4792
118	2.706	2.476	1.093	177.168	0.0929	-2.3762
120	2.706	2.567	1.054	180.108	0.0541	-2.9169
122	2.706	2.456	1.102	182.988	0.1018	-2.2847
124	2.706	2.564	1.055	185.808	0.0554	-2.8931
126	2.706	2.621	1.032	188.568	0.0324	-3.4295
130	2.706	2.674	1.012	194.088	0.0120	-4.4228
142	2.706	2.692	1.005	211.008	0.0052	-5.259
144	2.706	2.684	1.008	213.708	0.0082	-4.8036
150	2.706	2.664	1.016	221.628	0.0158	-4.1477

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรารุณ วัดขนาด เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 ที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสตรีทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช และระดับปริญญาตรี วิทยา ศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550

ในปีการศึกษา 2550 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย