

ผลของอิทธิที่เอต่อการดูดซับโครเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมวลชีวภาพของสับปะรด



นางสาวกมลทิพย์ ดอกประทุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF EDTA ON CHROMIUM AND LEAD ADSORPTION FROM WASTEWATER BY
BIOMASS OF *Ananus comosus* (L.) MERR.



Miss Kamonthip Dokprathum

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของฮีตที่เอตต่อการดูดซับโครเมียมและตะกั่วจากน้ำเสีย
ด้วยมวลชีวภาพของสับปะรด

โดย

นางสาวกมลทิพย์ ดอกประทุม

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

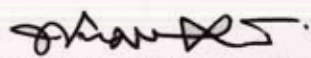
อาจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ หึงปรัชชา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เชาวน์ นกอยู่)

กมลทิพย์ ดอกประทุม: ผลของอีดีทีเอต่อการดูดซับโครเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมวลชีวภาพของสับปะรด. (EFFECT OF EDTA ON CHROMIUM AND LEAD ADSORPTION FROM WASTEWATER BY BIOMASS OF *Ananas comosus* (L.) MERR.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.พันธวิศ สัมพันธ์พานิช, 133 หน้า.

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารคีเลต คือ EDTA ต่อการดูดซับโครเมียม และตะกั่วด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด โดยการทดลองแบบแบดซ์ และคอลัมน์ ซึ่งการทดลองแบบแบดซ์ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับโครเมียม และตะกั่ว เมื่อมีการแปรค่าพีเอช ความเข้มข้นของ EDTA และเพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับของมวลชีวภาพ โดยทำการทดสอบไอโซเทอมของมวลชีวภาพ ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว และปริมาณน้ำเสียที่กำจัดได้ให้อยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งของโครเมียม และตะกั่ว คือ 0.25 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองในแบบแบดซ์พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชต่ำลง ในช่วงพีเอชที่ทำการศึกษา และเมื่อมีการเติมสาร EDTA ลงไปพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งคาดว่า EDTA มีผลต่อแรงดึงดูดที่ใช้ในการดูดซับของมวลชีวภาพ ซึ่งถ้าเติมสาร EDTA เข้าไปในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมก็สามารถช่วยให้มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วได้มากขึ้น แต่ถ้าเติมสาร EDTA ในระดับที่มากเกินไปก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของมวลชีวภาพลดลง จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับพบว่า ค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่า การดูดซับโครเมียม และตะกั่วบนมวลชีวภาพนั้นเป็น ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์หรือไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และความสามารถในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วเท่ากับ 81.15 และ 40.19 มิลลิกรัมต่อกรัมมวลชีวภาพ ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ทุกการทดลอง และภาวะที่เหมาะสมของมวลชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บเท่ากับ 150 นาที โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม และตะกั่วจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.46 และ 99.57 ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาเข้าสู่สมดุลมากกว่าการทดลองแบบแบดซ์ 20 เท่า

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต กมลทิพย์ ดอกประทุม

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก [ลายมือ]

5087105020: MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORDS : Adsorption / Biomass / Biosorption / Chromium / EDTA / Lead

KAMONTHIP DOKPRATHUM: EFFECT OF EDTA ON CHROMIUM AND LEAD ADSORPTION FROM WASTEWATER BY BIOMASS OF *ANANAS COMOSAS* (L.) MERR.) THESIS ADVISOR: PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 133 pp.

The objectives of this study were to investigate the effects of chelating agent, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), on chromium and lead adsorption from synthetic solution by biomass of *Ananas comosus* (L.) Merr. in both batch and column experiments. The aims of the batch experiment were to study efficiencies and adsorption capacities of biomass in removing chromium and lead at different pH, EDTA concentration. In order to find ability of adsorbent, isotherm test was conducted. The aim of column experiments were to study the efficiencies of chromium and lead removal measuring in term of wastewater pass through the column before the chromium and lead concentrations in water exceed the industrial wastewater standards. The batch experiment results shown that chromium and lead adsorption capacities increased with decreasing solution pH in the range of study. The presence of EDTA, at a EDTA concentration of 150 ppm showed the maximum chromium and lead adsorption efficiencies. Expected that EDTA effect of gravity on biomass, if addition of EDTA in the appropriate concentration the results showed that the adsorption of biomass efficiencies increased but if addition of EDTA in exceed concentration the results showed that the adsorption of biomass efficiencies decreased. From adsorption isotherm test cannot conclude exactly by langmuir isotherm and frundlich isotherm due to the nearby R^2 equal. Adsorption capacities are 81.15 and 40.19 mg/g biomass. The column experiment results shown that the volume of wastewater pass through the column ensured the chromium and lead concentrations in filtered water complied with the industrial wastewater standards in every experiment which take 20 times of batch experiment to reach equilibrium. The average efficiencies to reach the breakthrough point of chromium and lead adsorptions were 99.46 and 99.57 respectively.

Field of Study : Environmental Science.....

Student's Signature : *Kamonthip Dokprathum*

Academic Year : 2009.....

Advisor's Signature : *Pantawat Sampanpanish*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความช่วยเหลืออย่างดีของ อาจารย์ ดร. พันธุ์ศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์ และ ดร. เซาว์น นกอยู่ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายังเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุง และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ อนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ และอุปกรณ์ รวมถึงนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยครั้งนี้ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในหลายๆ ด้าน และคอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา (คุณพ่อกิม คุณแม่เมณีใส ดอกประทุม) และบุคคลในครอบครัวที่รัก ที่ได้ให้ความอบอุ่น อบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุน ให้ทุนทรัพย์เกี่ยวกับการเรียนในทุกๆ ด้าน ท่านเหล่านี้เป็นกำลังใจที่ดี และสำคัญที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนถึงวันที่ประสบความสำเร็จทางการศึกษา จึงขอมอบความดีต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้กับท่านเหล่านี้ ด้วยความรัก และเคารพตลอดไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.1.1 โครเมียม.....	4
2.1.2 ตะกั่ว.....	8
2.2 สับปะรด.....	10
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของสับปะรด.....	10
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด.....	11
2.3 สารเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออน.....	11
2.4 องค์ประกอบในเซลล์พืช.....	12
2.5 มวลชีวภาพ.....	14
2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	17
2.6.1 กระบวนการทางกายภาพ.....	17
2.6.2 กระบวนการทางเคมี.....	20
2.6.3 กระบวนการทางชีวภาพ.....	21

บทที่	หน้า
2.7 การดูดติดผิว.....	22
2.7.1 กลไกการดูดติดผิว.....	22
2.7.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	23
2.7.3 สมดุลการดูดติดผิว.....	24
2.7.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว.....	27
2.7.5 การดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	29
2.8 สาร EDTA.....	30
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3 วิธีดำเนินการศึกษา.....	40
3.1 แผนการทดลอง.....	40
3.1.1 การเตรียมมวลชีวภาพจากต้นและใบของสับปะรด.....	40
3.1.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	41
3.2 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
3.3.1 การทดลองแบบแบตช์.....	44
3.3.2 การทดลองแบบคอลัมน์.....	46
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	47
4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการทดลอง.....	48
4.1 ผลการทดลองแบบแบตช์.....	49
4.1.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของมวลชีวภาพจากสับปะรด.....	49
1.) ผลของ EDTA และผลของ pH.....	49
2.) ผลของเวลาสัมผัส.....	64
3.) การทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับของมวลชีวภาพ.....	74
4.2 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (column experiment).....	80
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ.....	96
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	114
ภาคผนวก ค.....	118
ภาคผนวก ง.....	120
ภาคผนวก จ.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	133



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ของสับปะรด.....	11
2.2	คุณสมบัติของสาร EDTA.....	31
4.1	การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่ไม่เติม EDTA (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L).....	50
4.2	การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 50 มิลลิกรัม/ ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L).....	50
4.3	การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L).....	51
4.4	การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 300 มิลลิกรัม/ ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L).....	51
4.5	การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 600 มิลลิกรัม/ ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L).....	52
4.6	ตารางเปรียบเทียบการตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้น ต่างๆ ของ EDTA ในแต่ละ pH.....	52
4.7	ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ (ปริมาณมวลชีวภาพ = 2.0 g).....	56
4.8	ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ (ปริมาณมวลชีวภาพ = 2.0 g).....	60
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	66
4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	71
4.11	การทดสอบไอโซเทอมแบบพรุนดิลิซของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	76
4.12	การทดสอบไอโซเทอมแบบพรุนดิลิซของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	77
4.13	ค่าคงที่ไอโซเทอมแบบพรุนดิลิซของมวลชีวภาพ.....	78

ตารางที่	หน้า
4.14	การทดสอบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร..... 78
4.15	การทดสอบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร..... 79
4.16	ค่าคงที่ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพ..... 80
4.17	การทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์..... 80

ตารางผนวก

๑1	ตารางการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบ ของสับปะรดที่ pH ต่างๆ (ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น = 50 mg/L)..... 123
๑2	ตารางการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของ สับปะรดที่ pH ต่างๆ (ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น = 50 mg/L)..... 124
๑3	ตารางการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบ ของสับปะรดที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน..... 125
๑4	ตารางการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของ สับปะรดที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน..... 128
๑5	ตารางการดูดติดผิวโครเมียมในคอลัมน์ของมวลชีวภาพจากต้น และใบของ สับปะรด..... 131
๑6	ตารางการดูดติดผิวตะกั่วในคอลัมน์ของมวลชีวภาพจากต้น และใบของ สับปะรด..... 132

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงองค์ประกอบในเซลล์พืช.....	13
2.2	โครงสร้างทางเคมีของสาร EDTA.....	31
2.3	โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างธาตุโลหะกับ EDTA.....	33
3.1	แสดงแผนผังการทดลอง.....	42
4.1	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ.....	57
4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ.....	57
4.3	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ.....	61
4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ.....	61
4.5	โครงสร้างของเซลล์ลูไลสในสภาพที่เป็นกรด.....	62
4.6	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	68
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	69
4.8	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	73
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	74
4.10	ไอโซเทอมแบบพรุนดลิซของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	76
4.11	ไอโซเทอมแบบพรุนดลิซของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	77
4.12	ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	78
4.13	ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	79
4.14	เส้นโค้งเบรคทรูจ์ในคอลัมน์ดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาที (C/C ₀).....	82
4.15	การดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาทีหรืออัตราการไหล 1.8 มล./ นาที.....	82
4.16	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาที.....	83

รูปที่	หน้า
4.17	เส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 100 นาที (C/C ₀)..... 84
4.18	การดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 100 นาทีหรืออัตราการไหล 1.0 มล./ นาที..... 84
4.19	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 100 นาที..... 85
4.20	เส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 150 นาที (C/C ₀)..... 86
4.21	การดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 150 นาทีหรืออัตราการไหล 0.6 มล./ นาที..... 86
4.22	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 150 นาที..... 87
4.23	เปรียบเทียบเส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิวที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50, 100 และ 150 นาที..... 88
4.24	เส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50 นาที (C/C ₀) 89
4.25	การดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50 นาทีหรืออัตราการไหล 1.8 มล./ นาที..... 89
4.26	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50 นาที..... 90
4.27	เส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 100 นาที (C/C ₀)..... 91
4.28	การดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 100 นาทีหรืออัตราการไหล 1.0 มล./ นาที..... 91
4.29	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 100 นาที..... 92
4.30	เส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 150 นาที (C/C ₀)..... 93
4.31	การดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 150 นาทีหรืออัตราการไหล 0.6 มล./ นาที..... 94
4.32	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 150 นาที..... 94
4.33	เปรียบเทียบเส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ ที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50, 100 และ 150 นาที..... 95

รูปผนวก	หน้า
ก1	(ก) (ข) (ค) และ (ง) ลักษณะของต้น และใบของสับปะรดที่ถูกตัด ก่อนนำมาล้างทำความสะอาด..... 104
ก2	(ก) และ (ข) ใบของสับปะรดที่ทำความสะอาดแล้ว (ค) และ (ง) ต้นของสับปะรดที่ทำความสะอาดแล้ว..... 105
ก3	(ก) ตู้อบ (oven) ที่ใช้ในการอบมวลชีวภาพ (ข) แสดงการอบมวลชีวภาพ..... 106
ก4	(ก) ใบของสับปะรดที่ผ่านการอบแล้ว และ (ข) ต้นของสับปะรดที่ผ่านการอบแล้ว..... 107
ก5	เครื่องปั่นมวลชีวภาพ..... 107
ก6	มวลชีวภาพที่ผ่านการบดแล้ว..... 108
ก7	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์..... 108
ก8	การเตรียมมวลชีวภาพสำหรับการทดลองแบบแบคทีเรีย..... 109
ก9	การทดลองแบบแบคทีเรีย..... 109
ก10	(ก) คอลัมน์ชนิดอะคริลิค (ข) คอลัมน์ที่ทำการบรรจุมวลชีวภาพแล้ว..... 110
ก11	Perlistatic pump..... 110
ก12	การทดลองแบบคอลัมน์..... 111
ก13	การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยเครื่อง UV-Spectro photometer..... 111
ก14	ตัวอย่างการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ใช้วิธีการ ของ USEPA method 7196A..... 112
ก15	เครื่อง Microwave digestion..... 113
ก16	เครื่อง Atomic absorption spectrometer; AAs..... 113
ค1	แผนผังการวิเคราะห์ตามวิธีการของUSEPA METHOD 3015A..... 119
ง1	แผนผังการวิเคราะห์ตามวิธีการของUSEPA METHOD 7196A..... 121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของสารชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โดยเฉพาะโลหะหนักที่มีการนำมาใช้ในกิจกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในอนาคต โลหะหนักบางประเภท เช่น โครเมียม และตะกั่ว เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่ดิน แหล่งน้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิต อาทิ น้ำที่ใช้ในการอุปโภคบริโภค ดินที่ใช้เพื่อการเพาะปลูกพืช และอากาศที่ใช้ในการหายใจ ซึ่งมักเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตทั้งหลายในโลก อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนต่างๆ ของสารในสิ่งแวดล้อมนั้นวันจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน และแหล่งน้ำ ด้วยสาเหตุของการปนเปื้อนต่างๆ มักเกิดจากกิจกรรมทางการเกษตร และการอุตสาหกรรม โดยภาคเกษตรกรรมส่วนใหญ่มักมีการใช้ปุ๋ยเคมี และสารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชทั้งที่เป็นพืช และสัตว์ ส่วนภาคอุตสาหกรรม สารเคมีหลายๆ ชนิดได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น นำมาใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีน้ำเสีย และกากของเสียอันตรายเกิดขึ้นตามมา ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือ การลักลอบทิ้งกากของเสียอันตรายในบริเวณพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวอย่างมาก ทำให้เกิดการปนเปื้อนทั้งในดิน แหล่งน้ำ อากาศ พืช และ สัตว์ ส่งผลให้ประชาชนในบริเวณพื้นที่และบริเวณใกล้เคียงนั้นได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของเสียอันตรายเป็นอย่างมาก จากปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และบริเวณใกล้เคียงได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยสารคีเลต (chelating agent) คือ EDTA และใช้วิธีการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) ด้วยมวลชีวภาพ (biomass) ที่ผลิตขึ้นจากต้น และใบของสับปะรดที่ได้ ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลของสับปะรดแล้ว ซึ่งเป็นการนำต้น และใบของสับปะรดที่เหลือมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง นอกจากการนำไปทำเป็นอาหารสัตว์ หรือนำใบสับปะรดไปทำเป็นกระดาษ และยังเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหา น้ำเสียจากการปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำเพราะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตรมาใช้ และยังเป็น การนำพืชที่มีมากในพื้นที่มาใช้ให้เป็นประโยชน์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และความสามารถของมวลชีวภาพจากต้น และใบของ สับปะรดในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาร EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) ช่วย ในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พื้นที่ศึกษาได้แก่ บริเวณตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง และบริเวณ โดยรอบนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
- 2) พืชที่ใช้ในการวิจัย คือ สับปะรด พันธุ์ปัตตาเวีย (*ananas comosus*) ซึ่งเป็นต้นและใบ ของสับปะรดที่ไม่มีการปนเปื้อนของสารพิษ และเป็นของเหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว
- 3) สารละลายที่ใช้ทำการศึกษาคือ
 - 3.1) สารละลายมาตรฐานโครเมียม (Cr) คือ โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate; $K_2Cr_2O_7$)
 - 3.2) สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) คือ ตะกั่ว(II)ไนเตรต (lead(II)nitrate; $Pb(NO_3)_2$)
- 4) สารสีเลดที่ใช้ทำการศึกษาคือ EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)
- 5) วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเพื่อหาค่าปริมาณโครเมียมทั้งหมด (TCr) และค่าปริมาณตะกั่ว ทั้งหมด (TPb)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบความประสิทธิภาพของมวลชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากต้นและใบของสับปะรดในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก 2 ชนิดได้แก่ โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb)

2) ทราบผลของการใช้สาร EDTA ที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิดได้แก่ โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb)

3) ได้แนวทางเลือกที่สามารถนำไปใช้ได้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากการลักลอบทิ้งของเสียอันตรายลงสู่ดิน และแหล่งน้ำหรือจากการลักลอบทิ้งลงในแหล่งน้ำโดยตรง

4) เพื่อช่วยส่งเสริมการนำของเหลือจากการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว รวมทั้งการนำผลการทดลองไปใช้ในการพัฒนาการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคาดว่าจะจะเป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมที่มีต้นทุนต่ำ

บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะคือ มีค่าออกซิเดชัน (oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) ได้รูปที่เสถียรรกว่าโลหะหนักอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (food chain) (เกศสุชา พูลคำ, 2536)

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะหนักต่างๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ เป็น 4 ประเภท คือ

- 1) โลหะหนักที่ให้คุณประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
- 2) โลหะหนักที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อลูมิเนียม
- 3) โลหะหนักที่มีการสะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น โครเมียม ตะกั่ว ปรอท และสารหนู เป็นต้น
- 4) โลหะหนักประเภทที่ไม่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อย แต่จะให้โทษถ้าได้รับในปริมาณที่สูง (วรวิทย์ (มปป.) อ้างถึงใน ประภฤต เลิศจรัสอร่ามดี, 2539)

2.1.1 โครเมียม (chromium)

โครเมียมเป็นธาตุแรกในหมู่ 6B ซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น Cr มีหมายเลขอะตอมเป็น 24 น้ำหนักอะตอม 51.9961 มีจุดเดือด 2,672 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,863 องศาเซลเซียส โครเมียมเป็นโลหะมันวาวสีเทา ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถตีขึ้นรูปได้ สถานะออกซิเดชันที่

ปรากฏมากที่สุดคือ +2, +3 และ +6 โดยที่ +3 เสถียรที่สุด +1, +4 และ +5 ปรากฏน้อยสำหรับ สารประกอบโครเมียมที่มีสถานะ +6 เป็นตัวออกซิไดส์อานูภาพสูง (ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2542)

2.1.1.1 การใช้ประโยชน์

โครเมียมในงานโลหะกรรม ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน และทำให้เกิดความมันวาว ผสมเป็นโลหะผสม เช่น มีดสแตนเลส การเคลือบโลหะ เกลือโครเมียมใช้ในการฟอกหนัง โปแตสเซียมไดโครเมต เป็นสารทำปฏิกิริยา ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ ยังใช้ในการทำให้สีย้อมติดผ้า โครเมียมไดออกไซด์ (CrO_2) ใช้ผลิตเทปแม่เหล็ก มีประสิทธิภาพสูงกว่าเทปที่ผลิตจากเหล็กออกไซด์

ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีการนำโครเมียมและสารประกอบโครเมียมมาใช้หลายประเภท เช่น การชุบโลหะ ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ผลิตโลหะอัลลอยด์ (alloy ผสมกับ nickel) ผลิตเม็ดสี ชุบเครื่องประดับ การย้อมผ้า การฟอกหนังสัตว์ เป็นต้น โครเมียมและสารประกอบโครเมียมมีหลายกลุ่ม โดยแบ่งตามวาเลนซ์ (valency) ได้แก่ 0, 1, 2, 3, 4 และ 6 ซึ่งกลุ่มวาเลนซ์ 3 (โครเมียมไตรวาเลนท์; trivalent chromium: Cr III) และวาเลนซ์ 6 (โครเมียมเฮกซะวาเลนท์; hexavalent chromium: Cr VI) จะเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญทั้งในด้านการนำมาใช้ประโยชน์ และผลกระทบต่อสุขภาพของคน นอกจากนี้ โครเมียมสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามคุณสมบัติทางเคมีได้เป็น

1) โลหะโครเมียม และอัลลอยด์ กลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และ chromium containing-alloy โดยทั่วไปกลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

2) โครเมียมไดวาเลนท์ (Cr^{2+}) หรือ chromous compounds ได้แก่ chromous chloride (CrCl_2) และ chromous sulfate (CrSO_4) กลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อย

3) โครเมียมไตรวาเลนท์ (Cr^{3+}) หรือ chromic compound เป็นที่ทราบกันว่าไตรวาเลนท์โครเมียมเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในขบวนการกลูโคสเมตาบอลิซึม (glucose metabolism) ส่วนสารประกอบ (compound) อื่นๆ ที่พบในกลุ่มนี้ ได้แก่ chromic oxide (Cr_2O_3), chromic sulfate ($\text{Cr}_2[\text{SO}_4]_3$), chromic chloride (CrCl_3), chromic potassium sulfate ($\text{KCr}[\text{SO}_4]_2$) และ chromite ore (FeOCr_2O_3)

4) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

4.1) กลุ่มที่ละลายน้ำได้ (water-soluble hexavalent compounds)

ได้แก่ chromic acid, anhydride of chromic acid, monochromate, dichromate of sodium, potassium, ammonium, cesium, rubidium และ lithium เป็นต้น

4.2) กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble hexavalent

compounds) ได้แก่ zinc chromate, calcium chromate, lead chromate, barium chromate, strontium chromate และ sintered chromium trioxide เป็นต้น

ในส่วนของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ มีรายงานการศึกษาในสัตว์ทดลอง และการศึกษาทางระบาดวิทยา ในคนงานที่ทำงานสัมผัสกับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ เป็นเวลานานๆ ที่สนับสนุนว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542)

จลนศาสตร์ (kinetic) ของโครเมียมขึ้นกับเลขออกซิเดชันหรือสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ในคนทั่วไปมีการประมาณว่า จะได้รับโครเมียมในรูปไตรวาเลนต์ (trivalent) จากอาหารที่บริโภคประจำวัน 50-200 ไมโครกรัม และ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ของอาหารที่บริโภคจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ส่วนโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ จะถูกดูดซึมจากระบบทางเดินอาหารได้ดีกว่าไตรวาเลนต์ ถึง 3-5 เท่า นอกจากนี้ โครเมียม และสารประกอบโครเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของ วาเลนซ์ ความสามารถในการละลายน้ำ ขนาดของอนุภาค และยังพบว่า โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ จะถูกดูดซึมจากระบบทางเดินหายใจได้ดีกว่าโครเมียมไตรวาเลนต์ด้วย ซึ่งคงเป็นผลมาจากการที่โครเมียมเฮกซะวาเลนต์สามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ได้ดี ส่วนการซึมผ่านทางผิวหนังทั้งโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ และโครเมียมไตรวาเลนต์ เป็นไปอย่างจำกัด ยกเว้นกรณีที่ผิวหนังได้รับอันตรายจากความร้อน (burn) ทำให้สารประกอบโครเมียมบางชนิดเข้าสู่ร่างกายได้ เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate) และโครเมียมคลอไรด์ (chromium chloride) ส่วนโครเมียมซัลเฟต (chromium sulfate) ไม่สามารถซึมผ่านทางผิวหนังได้ เมื่อโครเมียมเข้าสู่ร่างกายแล้วโครเมียมไตรวาเลนต์จะรวมกับทรานสเฟอริน (transferrin) ในพลาสมา (plasma) และกระจายไปทั่วร่างกาย มีเพียงส่วนน้อยที่เข้าไปในเม็ดเลือดแดง ส่วนโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ จะผ่านเข้าไปในเม็ดเลือดแดงอย่างรวดเร็ว และจะรวมกับบี-เชน (b-chain) ของฮีโมโกลบิน (hemoglobin) และเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบไตรวาเลนต์ (trivalent form) ในเม็ดเลือดแดงด้วย โครเมียมเกือบทั้งหมดจะถูกขับออกทางไต มีเพียงส่วนน้อยที่สะสมอยู่ใน

ร่างกาย มีการประมาณว่าผู้ใหญ่ที่มีสุขภาพแข็งแรง และได้รับโครเมียมจากอาหารวันละ 30-100 ไมโครกรัม จะมีระดับโครเมียมเฉลี่ยในปัสสาวะ 2-10 ไมโครกรัมต่อลิตร และครึ่งชีวิต (half-life) ของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในปัสสาวะอยู่ระหว่าง 15-41 ชั่วโมง นอกจากนี้ โครเมียมยังถูกขับออกทางน้ำดี ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของการขับออกทั้งหมดและมีปริมาณน้อยมากที่ขับออกทางนม น้ำนม เล็บ และเหงื่อ (ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542)

2.1.1.2 ความเป็นพิษ

ในกรณีที่ร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ร่างกายจะรับได้ ก็จะทำให้เกิดภาวะพิษโครเมียมได้ ทั้งในลักษณะการเกิดพิษแบบเฉียบพลัน และแบบเรื้อรัง โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity) มักพบในกรณีที่ได้รับโดยการกินโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium) เช่น โครมิกแอซิด (chromic acid) จะทำให้เกิดแอกคิวแกสโตรเอ็นเทอริทิส (acute gastroenteritis) ร่วมกับเผลด-กรีนโวมิตัส (yellow-green vomitus) หรือเสมอาที่เมซีส (hematemesis), เฮพาติค นิโครซีส (hepatic necrosis), แกสโตรอินเทสทินอล เฮมอร์เรจ แอควิว ทูบูลาร์ นิโครซีส (gastrointestinal hemorrhage acute tubular necrosis) และเรเนล เฟลเลอร์ (renal failure) นอกจากนี้ ในรายที่กินโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในปริมาณมากๆ จะทำให้มีเวอร์ติโก (vertigo), ทิรส์ท์ (thirst), แอบโดมินอล (abdominal pain), บลัดดี ไดแอร์ริเฮ (bloody diarrhea) ในรายที่รุนแรงอาจจะพบความผิดปกติเหล่านี้ร่วมด้วย เช่น เฮพาโทเรเนล (hepatorenal syndrome), ซีเวอร์ โคแอกกูโลพาที (severe coagulopathy), อินทราวาสคูลาร์ เฮโมไลซีส (intravascular hemolysis) และอาจเสียชีวิตได้ ซึ่งปริมาณที่โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (chronic toxicity) มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมเป็นเวลานานๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1) ความเป็นพิษต่อผิวหนัง และชั้นเยื่อเมือก (mucous membrane) มักมีสาเหตุจากการสัมผัสโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เป็นระยะเวลาหลายๆ จะเกิดแผลบริเวณผิวหนังที่ต้องสัมผัสโครเมียมเป็นประจำที่เรียกว่า โครม โฮล (chrome hole) หรือโครมซอร์ (chrome sore) พบมากในคนงานที่ใช้โครมิกแอซิด (chromic acid), แอมโมเนียม

ไดโครเมต (ammonium dichromate), โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate) และ โซเดียมไดโครเมต (sodium dichromate) ถ้าแผลไม่ลึกมากเมื่อรักษาด้วยยาประมาณ 3 อาทิตย์ แผลจะหาย ในรายที่รุนแรงทำให้เกิด อัลเลอร์จิก คอนแทคท์ เดอร์มาติติส (allergic contact dermatitis) ซึ่งเป็นอาการผื่นที่ที่เกิดขึ้นร่วมกับ อิมมูน ซิสเต็ม (immune system) จะพบแอด คิว หรือ โครนิค เอกซีมา (acute or chronic eczema) และจัดเป็นโครเมียม เซ็นซิวิตีตี (chromium sensitivity) ชนิด ดีเลย์ด-ไทป์ (คลาส IV) ไฮเปอร์เซ็นซิวิตีตี รีแอคชั่น (delayed-type (class IV) hypersensitivity reaction) นอกจากนี้ในรายคนงานที่ต้องสัมผัสกับโครเมต ดัสท์ (chromate dust) จะพบคอนจันติวิตี (conjunctivitis), แลคริเมเนชั่น (lacrimation), เรสไพเรทอรี อิริเทชัน (respiratory irritation), รินิทิส (rhinitis), อีพิตาซิส (epitaxis), และที่พบบ่อยคือ อัลเซอเรชัน (ulceration) หรือเพอร์ฟอเรชัน ออฟ นาซาล เซปตัม (perforation of nasal septum)

2.2) การเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogenicity) โดย The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ US Toxicology Program จัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เป็นสารที่ก่อมะเร็งในมนุษย์ (human carcinogen) ด้วยความสามารถในการละลายน้ำที่ดีของสารประกอบโครเมียม เช่น สตรอนเนียม (strontium) และซิงค์โครเมต (zinc chromates) จึงพบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดมะเร็งปอด ซึ่งพบค่อนข้างมากกว่ามะเร็งชนิดอื่น นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดมะเร็งปอดในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เป็นเวลามากกว่า 30 ปีขึ้นไป จะมีความเสี่ยงสูงกว่าคนงานที่มีอายุน้อยกว่า (ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542)

2.1.2 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วเป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ 4A ที่มีหมายเลขอะตอมเป็น 82 มีสัญลักษณ์ คือ Pb น้ำหนักอะตอม 207.19 ตะกั่วเป็นธาตุโลหะที่มีสีเงินแกมฟ้า เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง แบตเตอรี่ กระสุนปืน ซึ่งสามารถพบได้ตามธรรมชาติ โดยปกติมักพบตะกั่วปะปนอยู่กับกำมะถัน ซึ่งก่อนที่จะนำตะกั่วมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม จำเป็นต้องแยกโลหะทั้งสองชนิดนี้ออกจากกันเสียก่อน โดยการเผาด้วยความร้อนสูงแล้วจึงพ่นอากาศเข้าไป ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับตะกั่ว และกำมะถัน เกิดเป็นตะกั่วออกไซด์ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะนำไปใช้ในการผลิตกรดกำมะถัน สำหรับตะกั่วออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ และหากนำตะกั่วออกไซด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการดูดซับออกซิเจน จะได้ตะกั่วบริสุทธิ์ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้เช่นกัน

2.1.2.1 การใช้ประโยชน์

ตะกั่วที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ (1) สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว และ (2) สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว ซึ่งตะกั่วทั้งสองชนิดนี้ได้นำมาใช้ในการผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคหลายประเภท เช่น สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว เช่น เลดโมนอกไซด์ (lead monoxide) เลดออกไซด์ (lead oxide) เลดซัลเฟต (lead sulfate) และ เลดอะซิเตต (lead acetate) ใช้ในการผลิตสีทาบ้านสีป้องกันสนิม หมึกพิมพ์ แบตเตอรี่รถยนต์ บัดกรี แผ่นกรองสำหรับอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ เครื่องแก้ว เครื่องเคลือบ เซรามิก ยาง เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว เช่น เตตราเอทิล เลด (tetraethyl lead) และเตตราเมทิล เลด (tetramethyl lead) ใช้ในการผลิตสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ น้ำมันเบนซิน เป็นต้น

2.1.2.2 ความเป็นพิษ

ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ 2 ลักษณะคือ (1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน และ (2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity) ผู้ได้รับตะกั่วจะรู้สึกผิวด คอ มีกลิ่นโลหะในปาก กระหายน้ำ คอแห้ง ปวดแสบหน้าท้อง คลื่นไส้ อาเจียน อาเจียนอาจมีลักษณะขาวขุ่นจากเลดคลอไรด์ (lead chloride) ผู้ได้รับตะกั่วส่วนมากจะมีอาการท้องร่วง และส่วนน้อยท้องผูก อุจจาระมีเลือดหรือมีสีดำ อันเนื่องมาจากเลดซัลไฟด์ (lead sulfide) ผู้ได้รับตะกั่วบางรายอาจเกิดอาการช็อค กล้ามเนื้อกระตุก อ่อนเพลีย เป็นตะคริว โดยเฉพาะที่ขาทั้งสองข้าง หรือมีอาการของระบบประสาทส่วนกลาง เช่น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ หรืออาจมีอาการผิดปกติที่ไร้สาเหตุ เช่น รู้สึกชา ซึมเศร้า ถึงขั้นโคม่า และเสียชีวิตในที่สุด อาการที่รองลงไป ได้แก่ ภาวะไตเสื่อม ทำให้โปรตีนในปัสสาวะน้อยกว่าปกติมีอัลบูมิน (albumin) และมีเม็ดเลือดแดงในปัสสาวะ เจ็บไต นอกจากนี้ จะมีการสลายตัวของเม็ดเลือดแดง อาจทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 2-3 วัน

2) ความเป็นพิษเรื้อรัง (chronic toxicity) ผู้ได้รับตะกั่วอาจมีอาการทางระบบทางเดินอาหาร และทางระบบประสาท อาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น เบื่ออาหาร เหนื่อยอ่อนในลำคอ ท้องผูก เป็นตะคริวที่หน้าท้อง อาการทางระบบประสาท เช่น ช้อมือตก เป็นอัมพาต ไม่มีแรง แต่ยังคงมีความรู้สึก อาการทางสมองหรือเยื่อหุ้มสมองอักเสบ อาการนี้พบน้อย

ในผู้ใหญ่ส่วนมากมักจะเกิดขึ้นกับเด็ก เช่น เด็กที่กำลังร่าเริงว่องไว อยู่ดี ๆ ก็หมดสตินานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากสถิติผู้ป่วยที่มีอาการทางสมองบางรายเสียชีวิต และประมาณร้อยละ 25 ของผู้รอดชีวิตอาจมีอาการทางประสาทอย่างถาวร (งามพิศ แย้มนิยม, 2525)

2.2 สับปะรด

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของสับปะรด

สับปะรดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Ananas comosus* (L.) Merr มีอายุตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงเก็บผลได้ระหว่าง 14-18 เดือน มีใบประมาณ 35 ใบ เมื่อผลสุกจะเหลือใบเพียง 25-30 ใบ ใบสับปะรดมีลักษณะเหมือนหอก โดยกว้างประมาณ 3-6 เซนติเมตร ค่อย ๆ ยาวเรียวยาวแหลมออกไป แต่ละใบยาวประมาณ 90-150 เซนติเมตร มีความหนาประมาณ 0.3-0.5 เซนติเมตร เนื้อเยื่อของใบสับปะรดสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้มาก ทำให้ต้านทานต่อความแห้งแล้งได้นานหลายเดือน และสามารถบังคับสับปะรดให้สุกหมุนเวียนกันตลอดทั้งปี โดยการใส่แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ซึ่งการปลูกครั้งหนึ่งจะให้ผลถึง 3 ครั้ง ต้นสับปะรดเมื่อให้ผลแล้วใบยังคงสภาพดีอยู่ 10-15 ใบ ซึ่งการตัดคราดทิ้งใบของเกษตรกรไว้ใบแปลงปลูก มักทำให้เกิดการหมักเน่ากลายเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงระบาดไปทั่วแปลงปลูก สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี ปลูกได้ในดินแทบทุกแห่งในประเทศไทย เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เมื่อเจริญเป็นผลแล้วจะเจริญต่อไปโดยตาที่ลำต้น จะเติบโตเป็นต้นใหม่ได้อีก และสับปะรดสามารถตัดแปลงเป็นไม้ประดับได้อีกด้วย สับปะรดแบ่งออกตามลักษณะความเป็นอยู่ได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ พวกที่มีระบบรากหาอาหารอยู่ในดิน หรือเรียกว่าไม้ดิน พวกอาศัยอยู่ตามคาบไม้หรือลำต้นไม้ใหญ่ ได้แก่ ไม้อากาศต่างๆ ที่ไม่แย่งอาหารจากต้นไม้ที่มันเกาะอาศัยอยู่ พวกนี้ส่วนใหญ่จะเป็นไม้ประดับ และพวกที่เจริญเติบโตบนผาหินหรือโขดหิน ส่วนสับปะรดที่เราใช้บริโภคจัดเป็นไม้ดิน แต่ยังมีลักษณะบางประการของไม้อากาศเอาไว้ คือ สามารถเก็บน้ำไว้ตามซอกใบได้เล็กน้อย และมีเซลล์พิเศษสำหรับเก็บน้ำเอาไว้ในใบ ทำให้ทนทานในช่วงแล้งได้ สำหรับรูปลักษณะของสับปะรดซึ่งเป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี สูงประมาณ 90 - 100 เซนติเมตร มีลำต้นอยู่ใต้ดิน ใบเดี่ยวเรียงสลับ ซ้อนกันถี่มากรอบต้น สับปะรดไม่มีก้านใบ ดอกช่อออกจากกลางต้น มีดอกย่อยจำนวนมาก ผล เป็นผลรวม รูปทรงกระบอก และมีใบเป็นกระจุกที่ปลาย สับปะรดต้องการอากาศค่อนข้างร้อนอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 23.9-29.4 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนที่ต้องการอยู่ในช่วง 1,000-1,500 มิลลิเมตรต่อปี แต่ต้องตกกระจายสม่ำเสมอตลอดปี และมีความชื้นในอากาศสูง สับปะรดชอบขึ้นในดินร่วน ดินร่วนปนทราย ดินปนลูกรัง ดินทรายชายทะเล และชอบที่ลาดเท เช่น

ที่ลาดเชิงเขา สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินควรเป็นกรดเล็กน้อย คือตั้งแต่ 4.5-5.5 แต่ไม่เกิน 6.0 (รัชניים รุกขชาติ, 2544)

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด

สับปะรดมีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ของสับปะรด (รัชניים รุกขชาติ, 2544)

องค์ประกอบ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
Holo cellulose	39.02
Alpha cellulose	25.60
Beta cellulose	7.50
Gamma cellulose	6.10
Alcohol benzene solubility	10.00
Lignin	11.60
อื่นๆ	0.18

2.3 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (cellulose ion exchanger)

โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เซลลูโลสผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลส และหมู่คาร์บอกซิล 15 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับเรซินสังเคราะห์ แต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงร่างตาข่ายของเซลลูโลสจะเป็นไฮโดรฟิลิก แต่โครงร่างตาข่ายของเรซินสังเคราะห์เป็นไฮโดรโฟบิก เนื่องจากเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์การยึดเกาะกันของโครงร่างตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไอออนอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนโครงร่างตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไอออนอยู่ตาม

ตำแหน่งต่างๆ บนโครงร่างตาข่ายซึ่งมีระยะประมาณ 50° A ดังนั้นไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านเรซินแบบสังเคราะห์ได้จะสามารถผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนสารเซลลูโลส แลกเปลี่ยนไอออนจากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส พบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่ง 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีหมู่ไอออนมาเกาะอยู่ การที่บอกตำแหน่งที่แน่นอนทำได้ยาก แต่จากการศึกษาทางเคมีของเซลลูโลสพบว่า คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 และ 6 เป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงร่างของเซลลูโลส และองค์ประกอบอื่นๆ แต่จะไม่มีผลต่อเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน การปรับปรุงลักษณะของโครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชันในเซลลูโลสสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น (ชัชฎาพร องอาจ, 2545)

2.4 องค์ประกอบในเซลล์พืช

องค์ประกอบในเซลล์พืชแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ ดังแสดงได้ในรูป 2.1 คือ

1) ลิกนิน (lignin)

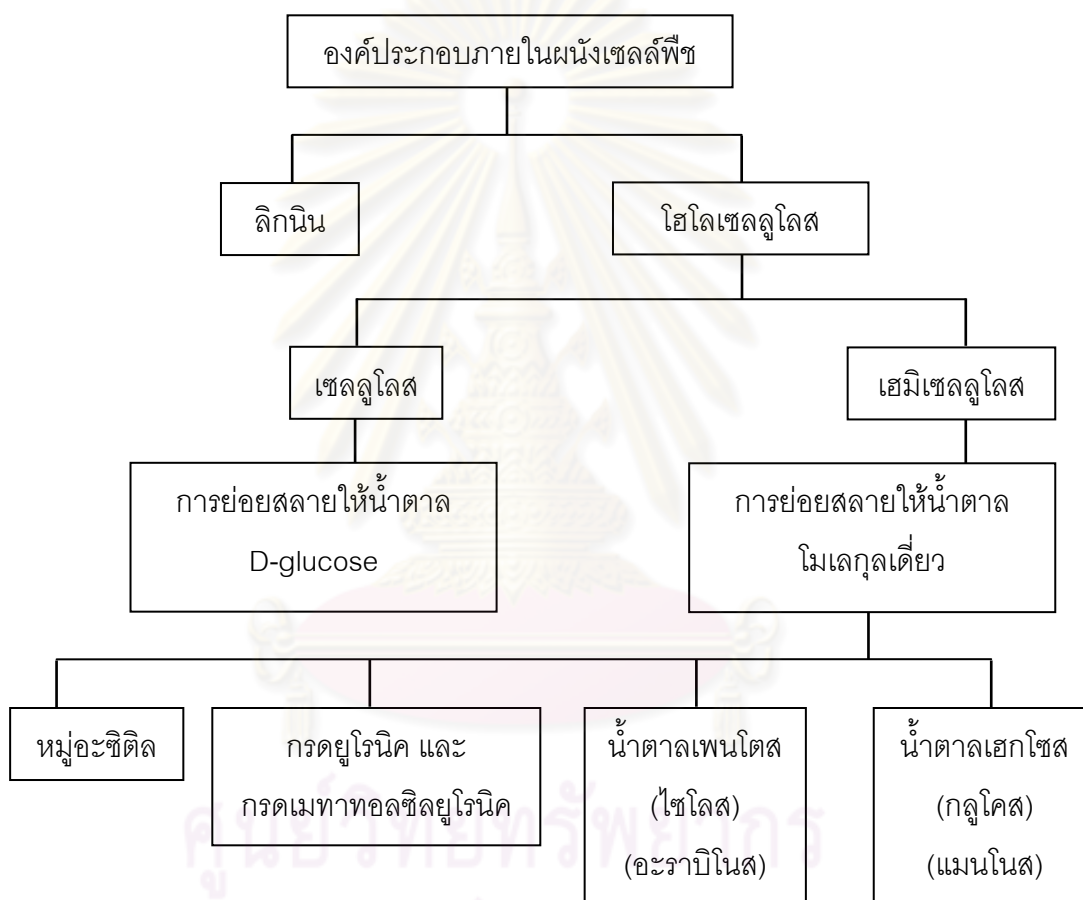
ลิกนินจัดอยู่ในพวก heterogenous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืชโดยอยู่รอบๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่ methyl group ($-CH_3$), หมู่ hydroxyl group ($-OH$) และส่วนที่เป็น Phenolic โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบซึ่งประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้ คือ

- ฟีนิลโพรเพน (phenyl propane)
- กัวนิอะซิล ยูนิค (syringyl unit)
- พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิค (para-hydroxyphenyl unit)

2) ไฮโดรเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

2.1) เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์เป็นสารที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เพราะเป็นส่วนประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช เช่นเนื้อไม้จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นยังเกิดในรูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบในเซลล์พืช (ซัชฎาพร องอาจ, 2545)

โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glucose ซึ่งจะเชื่อมกันด้วยพันธะ β -glucose คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ ไม่ละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายต่างอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่ จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรด และในด่างได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.1.1) แอลฟา-เซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์

2.1.2) เบต้า-เซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์

2.1.3) แกมมา-เซลลูโลส เป็นลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์ และสามารถละลายได้ดีในกรดเจือจาง

2.2) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentose) ที่มีลักษณะเป็น heterogenous โดยประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลัก คือ xylan นอกจากนี้ก็ยังมี glucan, mannan, galactan เฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลเพนโตส และเฮกโซส ได้แก่ ไชโลส แมนโนส กาแลคโตส และอะราบินโนส สำหรับ xylan ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลดี-ไชโลส ที่ต่อกันด้วยพันธะเบตา 1,4 ไชโลซิดิก (1,4 xylosidic linkage) อาจเป็นเส้นตรง ไชโลสอย่างเดียวหรือมีส่วนอื่นๆ เช่นมีกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ปนอยู่ เช่น อะราบินอฟูราโนส (arabinofuranose) เชื่อมต่อกับดี-ไชโลสที่มีตำแหน่ง 0-3 และดี-กลูคูโรนิกแอซิด (0-3 - D-glucuronic acid) หรือ 4-0 และเมทิล-กลูคูโรนิกแอซิด (4-0-methyl-glucuronic acid) ซึ่งต่อกับดีไชโลส (D-xylose) ที่ตำแหน่ง 0-2 (ชัชฎาพร องอาจ, 2545)

2.5 มวลชีวภาพ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิดเช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพารา และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ผลผลิตบางส่วนมีเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศ สร้างรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท จึงถือว่าประเทศไทยเป็นครัวของโลก อย่างไรก็ตามระหว่างการผลิตและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ก่อให้เกิดชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น เศษไม้ยางพารา แกลบ ฟางข้าว เหว้า มันสำปะหลัง และกากอ้อย เป็นต้น ชีวมวลบางส่วนถูกนำมาแปรรูปเป็นปุ๋ย วัตถุดับ และเชื้อเพลิง บางส่วนถูกเผาทิ้ง โดยเปล่าประโยชน์เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย ยอดอ้อย และรากไม้ยางพารา เป็นต้น

พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีเทียบเท่ากับถ่านลิกไนท์ 54 ล้านตัน (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

ในพจนานุกรมของราชบัณฑิตยสถานไม่ได้ระบุความหมายชีวมวลไว้ ชีวมวลแปลมาจากศัพท์ภาษาอังกฤษว่า “Biomass” ประกอบด้วยคำสองคำคือ ชีว และมวล ชีวคือ สิ่งมีชีวิตเช่น มนุษย์ พืช และสัตว์ มวลคือ วัตถุสิ่งของต่างๆ ดังนั้นชีวมวลหมายถึง วัตถุหรือสสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิตเช่น ข้าวสาร รำ แกลบ และฟางข้าวได้มาจากต้นข้าว และมูลสุกรได้มาจากการเลี้ยงสุกร เป็นต้น แต่ในทางตรงกันข้ามน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินได้มาจากการทับถมของซากพืชและสัตว์เป็นระยะเวลาหลายร้อยล้านปี ไม่ถือว่าเป็นชีวมวล เพราะไม่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต อีกความหมายหนึ่งของชีวมวลคือ เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน เนื่องจากพืชต้องอาศัยแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์ และเจริญเติบโต จากนั้นแปรเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งเช่น เศษไม้ ข้าวโพด และต้นอ้อย หรือแปรสภาพเป็นของเหลวเช่น น้ำมันพารา น้ำมันพืช ไบโอดีเซล และเอทานอล จะเห็นว่าชีวมวลมีความหมายค่อนข้างกว้าง ชีวมวลบางชนิดเหมาะที่นำมาบริโภคมากกว่าเป็นพลังงาน หรือกล่าวได้ว่า มวลชีวภาพ หมายถึง เนื้อสารของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งพืช และสัตว์ ซึ่งสามารถนำมาเปลี่ยนรูปให้เกิดพลังงาน นำมาใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และสารดูดติดผิว โดยทำให้อยู่ในรูปของมวลชีวภาพหรือเรียกว่า การดูดซับทางชีวภาพ มวลชีวภาพผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตร หรือจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย กากปาล์ม และกากมันสำปะหลัง เป็นต้น

2.5.1 แหล่งกำเนิด

ชีวมวลที่มาจากพืชนั้นถ้าจะแบ่งตามแหล่งที่มา สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.5.1.1) ชีวมวลที่หาได้จากตามโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น

- 1) แกลบได้จากโรงสีข้าว
- 2) ปีกไม้ เศษไม้ และขี้เลื่อยได้จากโรงเลื่อยไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้
- 3) ใยปาล์ม ทะลายปาล์ม และกะลาปาล์มได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
- 4) ชังข้าวโพดได้จากไซโลเก็บข้าวโพด
- 5) ชายอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล

- 6) เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานแป้งมัน
- 7) เปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้จากโรงไม้สับ เป็นต้น

ชีวมวลประเภทนี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากรวบรวมได้ง่าย

2.5.1.2) ชีวมวลที่หาได้จากตามไร่ สวน และนาข้าวเช่น

- 1) ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว
- 2) ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยางพาราอยู่ในสวนยางพารา
- 3) ใบอ้อย และยอดอ้อยอยู่ในไร่อ้อย
- 4) เหง้ามันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง
- 5) ทะลายปาล์มหรือใบปาล์มอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน
- 6) ซังข้าวโพดได้จากไร่ข้าวโพด เป็นต้น

การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ และรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นส่วนใหญ่ถูกเผาทิ้งอยู่ทุกปี

2.5.1.3) ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะเช่น การปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำไม้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย เพราะไม่คุ้มต่อการลงทุน (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

มวลชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากต้น และใบของสับปะรดนั้น เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตรมาใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนัก โดยใช้เป็นสารดูดติดผิว แทนการใช้สารสังเคราะห์ ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง และย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ เนื่องจากองค์ประกอบสำคัญที่อยู่ในสับปะรด คือ เซลลูโลส โดยโครงสร้างของเซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ (อริชัย นพแก้ว, 2539)

2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

2.6.1 กระบวนการทางกายภาพ (physical unit operation)

กระบวนการทางกายภาพเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำระหว่างโมเลกุล หรือที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ในที่นี้การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิวแต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และเกิดเป็นชั้นทับกันหลายๆ ชั้นที่ผิวของสารดูดติดผิว อย่างไรก็ตาม ภายโดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้ นั่นคือโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้ง่าย ซึ่งการดูดติดผิวทางกายภาพมีหลายประเภท ดังนี้

1) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมกันมานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้

2) กระบวนการดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิว เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลว หรือก๊าซ ให้เกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์นี้จัดว่าเป็นการเคลื่อนย้ายของสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซไปยังของแข็ง การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับสารละลายของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของสองสภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง

3) กระบวนการไฟฟ้าเคมี

วิธีนี้เป็นกระบวนการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนในการบำบัดสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

4) กระบวนการเมมเบรน (membrane processes)

กระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการที่สามารถใช้แยกสารที่มีขนาดเล็ก เช่น อีออน น้ำ จนกระทั่งสารที่มีขนาดใหญ่ที่จัดเป็นสารแขวนลอย เมมเบรนแต่ละชนิดมีความสามารถในการแยกสารแตกต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารป้อน เช่น ขนาด และประจุของสาร คุณสมบัติของเมมเบรน เช่น ขนาดรูพรุน ระดับความดันที่ใช้อยู่ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 0.5 ถึง 100 bar กระบวนการที่ใช้แยกสารประเภทอีออน สารโมเลกุลเล็กคือ RO และ NF ต้องใช้เมมเบรนที่ไม่มีรูพรุนหรือเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ($< 2 \text{ nm}$) ซึ่งมีความต้านทานการไหลของเพอเมอเมตสูง และสารป้อนซึ่งเป็นสารโมเลกุลเล็กหรืออีออน มีความดันออสโมติก (osmotic pressure) สูง ทำให้ระดับความดันที่ใช้ต้องสูงในระดับ 30-100 bar และ 10-40 bar สำหรับกระบวนการ RO และ NF ตามลำดับ กลไกการแยกสารสำหรับเมมเบรนที่เกิดขึ้น กับกระบวนการ RO และ NF ใช้หลักการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion) และการไหลผ่านรู (porous flow) การแยกสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ อนุภาคแขวนลอย ควรใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นประมาณ 2-20 nm สำหรับกระบวนการ UF และ 0.05 - 1 mm สำหรับกระบวนการ MF โดยมีกลไกการแยกสารที่ใช้หลักการคัดขนาด (sieving)

5) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซิน (resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคตไอออนเอกเชนเจอร์ (cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (anion exchanger) วิธีนี้จะเหมาะสำหรับ

การกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

6) กระบวนการไอออไนซิงเรดิเอชัน (ionizing radiation)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่รังสีทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ เป็นรังสีที่กระทบกับสารใดๆ แล้วก็ตาม จะทำให้เกิดการแตกประจุบวกหรือลบที่สารนั้นๆ ซึ่งการมีประจุไฟฟ้าของสารต่างๆ นี้ จะทำให้กระบวนการทางชีววิทยาของสารนั้นถูกรบกวนไปด้วย รังสีชนิดนี้จัดเป็นพลังงานระดับสูงที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปเรียกว่ากัมมันตรังสี (radio active) จะพบว่ารังสีที่ทำให้เกิดประจุนี้มี 2 ลักษณะคือ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความถี่สูงมาก เคลื่อนที่ไปในลักษณะของคลื่น เช่น x-ray และรังสีแกมมาหรือเป็นอนุภาคเช่น รังสีแอลฟา รังสีเบตา โดยรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุสามารถแบ่งได้ดังนี้

6.1) อนุภาคแอลฟา (alpha) มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียมประกอบด้วยโปรตอนสองตัว และนิวตรอนสองตัว ดังนั้นอนุภาคแอลฟาจึงมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก โดยมีประจุเป็นสองเท่า และน้ำหนักอะตอมเป็นสี่เท่าอนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 19,200 กิโลเมตรต่อวินาทีหรือประมาณ 1 ใน 15 เท่าของความเร็วของแสง เนื่องจากอนุภาคนี้ค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่นมันจึงไม่สามารถทะลุผ่านเนื้อวัตถุได้ง่ายเหมือนอนุภาคอื่นๆ แต่จะสามารถถูกกั้นให้หยุดได้ โดยใช้กระดาษ 1 ชั้นหรือ 2 ชั้นหรือทะลุผ่านได้ถึงเพียงแค่ผิวหนังเท่านั้น และโดยปกติเคลื่อนที่ได้ไม่เกินกว่า 9 เซนติเมตร ในอากาศเมื่ออนุภาคแอลฟาชนอะตอมหรือโมเลกุลของวัตถุใดจะทำให้ไอเลคตรอนหลุดออกมาเป็นสาเหตุให้เกิดไอออน

6.2) อนุภาคเบตา (beta) เป็นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากกว่าความเร็วของอนุภาคแอลฟาถึงสิบเท่าหรืออาจจะมากกว่าขึ้นไป อนุภาคเบตานี้มีประจุไฟฟ้าลบสามารถเบี่ยงเบนได้ในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก เนื่องจากขนาดของอนุภาคนี้เล็ก และมีความเร็วสูงจึงสามารถทะลุผ่านวัตถุหน้าได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟา โดยสามารถทะลุเข้าไปในเนื้อเยื่อได้ถึง 1-2 เซนติเมตร และอาจกั้นอนุภาคเบตานี้ได้ด้วยชั้นโลหะบางๆ

6.3) รังสีแกมมา (gamma rays) เป็นรังสีช่วงความถี่สูงมากกว่ารังสีเอ็กซ์ ไม่มีน้ำหนัก และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ ประมาณ 297,600 กิโลเมตรต่อวินาที มีสมบัติเหมือนรังสีเอ็กซ์คือ สามารถทะลุผ่านร่างกายมนุษย์หรือเนื้อวัตถุหนาๆ เช่น ไม้หรือโลหะได้ และยังพบว่า มีอำนาจทางการทะลุผ่านดีกว่ารังสีเอ็กซ์ จากการทดลองพบว่า รังสีแกมมาสามารถทะลุผ่านคอนกรีตหนาประมาณ 1 ฟุตได้ แต่จะสามารถดูดซับได้หมดในคอนกรีตที่มีความหนา 1 เมตร

6.4) รังสีเอ็กซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับรังสีแกมมาแต่แผ่ออกมาจากวงโคจรของอิเล็กตรอนรังสีเอ็กซ์มีพลังงานต่ำกว่ารังสีแกมมา

2.6.2 กระบวนการทางเคมี (chemical unit processes)

กระบวนการทางเคมีเป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแกร่งกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับแรงที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อชั้นบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล และไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระได้ เมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้น กำลังของสารดูดติดผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน ซึ่งประเภทของกระบวนการดูดติดผิวทางเคมีประกอบด้วย

- 1) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)
- 2) กระบวนการรีดักชัน (reduction)

ทั้งสองกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้

2.6.3 กระบวนการทางชีวภาพ (biological unit processes)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการใหญ่คือ กระบวนการแบบใช้อากาศ (aerobic digestion) และกระบวนการแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion)

1) กระบวนการชีวภาพแบบแอโรบิก (aerobic digestion)

สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ขึ้นจำนวนมาก (ประมาณร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์) ข้อได้เปรียบของกระบวนการบำบัดแบบนี้คือ ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น แต่มีข้อเสียคือต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง เนื่องจากต้องมีการพ่นอากาศให้กับระบบ และยังคงกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน นอกจากนี้กระบวนการบำบัดแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กับน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ๆ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการให้ออกซิเจนอย่างเพียงพอกับระบบ

2) กระบวนการแอนแอโรบิก (anaerobic digestion)

กระบวนการแอนแอโรบิก เป็นกระบวนการย่อยทางชีววิทยาแบบไร้อากาศ ที่ใช้แบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศหลายกลุ่ม ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ และสลับซับซ้อน อันได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ คือแก๊สชีวภาพ (biogas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สหลายชนิดโดยมีแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแก๊สอื่นๆ เช่น (NH_4^+) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย แก๊สมีเทนเป็นแก๊สที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงโดยสามารถให้พลังงานความร้อนได้สูงถึง 9,000 กิโลแคลอรี/ม³ หรือ 21,000 กิกจูล/ม³ ดังนั้นแก๊สชีวภาพซึ่งปกติจะมีแก๊สมีเทนอยู่ประมาณ 60 - 65 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์ที่สันดาปภายใน หรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ และกระแสไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศมีกระบวนการที่สลับซับซ้อนมาก โดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้นนับร้อยกระบวนการซึ่งต้องอาศัยเอนไซม์ หรือตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยาด้วย แม้ว่าการศึกษเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะมีการศึกษากันมา

อย่างยาวนาน แต่ในปัจจุบันการศึกษาทางด้านนี้ก็ยังไม่หยุดนิ่ง ยังคงมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ทราบถึงกลไก และลักษณะการทำงานของแบคทีเรีย และทำให้การออกแบบและควบคุมระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

2.7 การดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิว (adsorption) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดติดผิวของสารละลาย การดูดติดผิว เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้เกาะจับ และติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์นี้จัดว่าเป็นการเคลื่อนย้ายของสาร (mass transfer) จากของเหลว หรือก๊าซไปยังของแข็ง การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของสองสภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) พื้นผิวที่กล่าวไปนั้นไม่ได้หมายความเฉพาะแค่พื้นผิวรอบๆ รูปทรงกลมของสารดูดติดเท่านั้น แต่ยังหมายรวมถึงพื้นที่ภายในโพรง หรือรูที่อยู่ภายในสารดูดติดทั้งหมดที่มีความสามารถในการเป็นที่ยึดเกาะของสารดูดซับ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

2.7.1 กลไกการดูดติดผิว (adsorption mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (binding force) หลายนชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ และพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากกิริยา (action) ของแรงวันเดอร์วาลส์ (van der waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (london dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของสารดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayered) คือ การเกาะตัวของโมเลกุลของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเป็นชั้นๆ ตามความเข้มข้นของสารละลาย แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้า

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดติดผิวทางเคมีเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนการดูดติดผิวทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (desorption) ขึ้น

2.7.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer)

อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล และขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน คือ

1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายในชั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน (อิริชัย นพแก้ว, 2539)

2.7.3 สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium)

การดูดติดผิวจากสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็งในขณะที่เกิดการดูดติดผิวขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดติด มีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายเมื่ออัตราการดูดติดผิว และอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (equilibrium state) ซึ่งเรียกว่า สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของทั้งระบบ ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย ค่าพีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุลในสารละลายมีอุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorption isotherm)

การอธิบายถึงข้อมูลของการดูดติดผิว มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎี และผลจากการทดลองรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีดังนี้

1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแบบแลงมัวร์ที่เรียกว่า Ideal localized monolayer model คือ

- 1.1) โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- 1.2) พื้นที่แต่ละบริเวณสามารถดูดติดได้เพียงโมเลกุลเดียว
- 1.3) พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- 1.4) พลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลาย โดยสารดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad \dots(2.1)$$

โดยที่

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสาร ดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อกรัม (mol/g)

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดี่ยว (monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อกรัม (mol/g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อกรัม (mol/g)

B = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์ (infinity) สมการ $X = (X_m b C_e) / (1 + B C_e)$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$C_e / X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad \dots(2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/X จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/X_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/bX_m$ สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ C_e ไปหารสมการ $C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m)$ จะได้สมการดังนี้

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e) (1/bX_m) \quad \dots(2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/bX_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m$

2) ไอโซเทอมแบบเบท (BET, brunauer emmerett-teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayer) ซึ่งมีสมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป สมการการดูดติดผิวแบบเบทซ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) [1 + (B-1)C_e/C_s] \quad \dots(2.4)$$

โดยที่

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อกรัม (mol/g)

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ ที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อกรัม (mol/g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อกรัม (mol/g)

B = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

สมการ $X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) [1 + (B-1)C_e/C_s]$ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$C_e/X(C_s - C_e) = (1/X_m B) + [(B-1)/X_m B] (C_e/C_s) \quad \dots(2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/X(C_s - C_e)$ กับ C_e/C_s จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(B-1)/X_m B$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m B$

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช (freundlich adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x/m = K C_e^{1/n} \quad \dots(2.6)$$

โดยที่

x = จำนวนของตัวถูกละลายที่ดูดติดผิวมีหน่วยเป็นมิลลิกรัม (mg) หรือโมลต่อลิตร (mol/l)

m = น้ำหนักของสารดูดซับมีหน่วยเป็นกรัม (g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) หรือโมลต่อลิตร (mol/l)

$K, 1/n$ = ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการแบบฟรอนดิชเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\text{Log } (x/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad \dots(2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\text{Log } (x/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ เมื่อ $\log C_e = 0 (C_e = 1)$ (อิชิฮะ นพแก้ว, 2539)

2.7.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

ในระหว่างที่มีการดูดติดผิวเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนสารดูดติดผิว (adsorbent) การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาคาร์บอนเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยมากเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนคาร์บอน ซึ่งอัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดติดผิวของคาร์บอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ขนาด และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area)

ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวเป็นส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายใน รูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2) ลักษณะของสารดูดซับ (nature of adsorbent)

สิ่งที่สำคัญในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่ง คือความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิว ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผันกับอัตราการดูดติดผิว

3) พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกซิล (OH^-) สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดติดผิวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดติดผิวนั้น โดยทั่วไปแล้วจะพบว่าการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง

4) อุณหภูมิ (temperature)

การดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบมากนักต่อกระบวนการดูดติดผิว

5) อัตราเร็ว (mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัด อัตราเร็วของการดูดติดผิวขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว

6) เวลาสัมผัส (contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของการดูดติดผิวแบบคอลัมน์

2.7.5 การดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (the adsorption column)

ในการดูดติดผิวแบบคอลัมน์ มวลชีวภาพจะถูกใส่ไว้ในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวซึ่งมีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของมวลชีวภาพ โดยเป็นการป้อนอย่างต่อเนื่อง

1) เขตการถ่ายเทมวล (mass transfer zone; MTZ)

เมื่อน้ำที่มีสารปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของสารดูดซับ เขตการถ่ายเทมวลก็เกิดขึ้นจากการดูดติดผิวอย่างต่อเนื่องของตัวถูกละลายในชั้นมวลชีวภาพ

ตัวถูกละลายจะถูกดูดติดผิวอย่างรวดเร็วในชั้นของมวลชีวภาพ จนกระทั่งปริมาณการดูดติดผิวเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดติดผิวก็จะเกิดขึ้นต่อไปในชั้นของมวลชีวภาพที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนแปลงสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดติดผิวนี้ เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของสารดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับ และปัจจัยของชลศาสตร์ เมื่อสารเคลื่อนที่ผ่านชั้นของมวลชีวภาพด้วยอัตราการไหลที่เร็วจะทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออกขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้าม หากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นของมวลชีวภาพอย่างช้าๆ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ในกรณีนี้มวลชีวภาพจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

2) ลักษณะเบรคทูร์จ์ (breakthrough characteristics)

ลักษณะเบรคทูร์จ์เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องของความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา น้ำที่ผ่านออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จะมีปริมาณตัวถูกละลายต่ำ ซึ่งตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะถูกดูดติดผิวโดยมวลชีวภาพในชั้นต้นๆ ของคอลัมน์เมื่อของเหลวไหลผ่านคอลัมน์เป็นจำนวนมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง และทำให้ปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกเพิ่มมากขึ้นที่ละน้อยจนกระทั่งชั้นของมวลชีวภาพในคอลัมน์ใกล้จะหมดสภาพปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำเข้า (อิริชัย นพแก้ว, 2539)

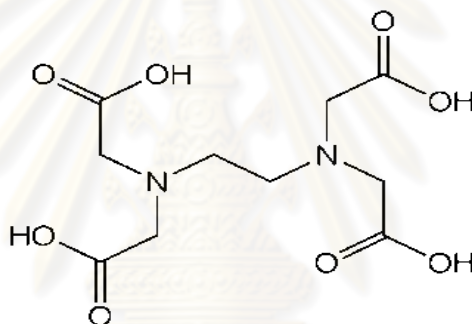
2.8 สาร EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)

EDTA มีโครงสร้างเป็นโมเลกุลของกรดอะมิโนมาต่อกันถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 และได้ถูกนำมาใช้ในการรักษาโรคพิษจากสารตะกั่ว ในปัจจุบันพบว่า สามารถจับสารตะกั่ว นิเกิล แคลเซียม โปรท อลูมิเนียม ยูเรเนียม สารเคมีจากโพลีเมอร์ หรือพลาสติกได้ นอกจากนี้ EDTA ยังเป็นสารที่ไม่มีการเผาผลาญในร่างกาย เป็นสารที่ไม่มีการสะสมในร่างกาย และละลายน้ำได้ดี

2.8.1 การทำงานของสาร EDTA

สาร EDTA เป็นสารที่ไม่มีการเผาผลาญในร่างกาย เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะถูกขับออกมาจากร่างกายในโครงสร้างเดิม จึงไม่มีการแพ้ต่อสารตัวนี้เกิดขึ้นต่อร่างกาย สาร EDTA จะไปจับเอาโมเลกุลของโลหะหนักที่เกาะอยู่ที่โมเลกุลของโปรตีนแล้วนำออกจากร่างกายโดยละลายผ่านไตแล้วขับออกมาทางปัสสาวะ ในปี ค.ศ.1950 มีการใช้สาร EDTA รักษาคนไข้โรคหัวใจและโรคเบาหวานที่มีเส้นเลือดแข็ง และตะกอนจับหลอดเลือดอย่างมาก ซึ่งไม่สามารถจะช่วยให้โดยวิธีการผ่าตัด ผลปรากฏว่าคนไข้เหล่านี้มีอาการของหัวใจดีขึ้น และอาการขาดเลือดของอวัยวะบางอย่างก็ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สาร EDTA จัดเป็นสารประกอบ Polyaminocarboxylic acids ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน (weak acid) มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของสาร EDTA (Skoog และ West, 1979)

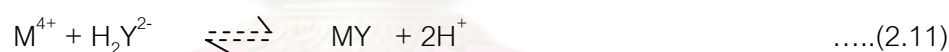
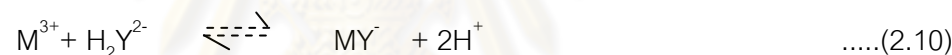
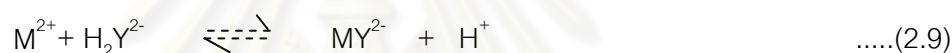
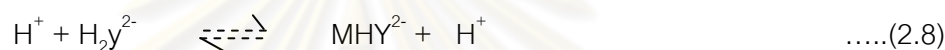
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสาร EDTA

คุณสมบัติ	แสดงผล
สูตรทางเคมี	$C_6H_{16}O_8N_2$
ลักษณะ	เกล็ดหรือผงสีขาว
มวลโมเลกุล	292.25
พีเอช	2.5-3.0
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.05 g/ 100 ml
ค่า chelation	3.39
จุดหลอมเหลว	240 องศาเซลเซียส

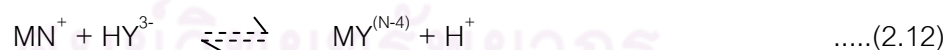
ที่มา: chemical (2003)

ความสามารถในการละลายของ EDTA จะถูกควบคุมโดยความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งจะมีลำดับของการแตกตัวเป็นไอออน 4 ครั้ง ในกรณีที่สารละลายตัวกลางมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 3 ถึง 6 EDTA สามารถแตกตัวให้อิออนอิสระในรูป H_2Y^{2-} ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายตัวกลางอยู่ในช่วง 6 ถึง 10 EDTA สามารถแตกตัวให้อิออนอิสระในรูปของ HY^{3-} และกรณีที่สารละลายตัวกลางมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 10 EDTA สามารถแตกตัวให้อิออนอิสระในรูปของ Y^{4-} (Skoog และ West, 1979)

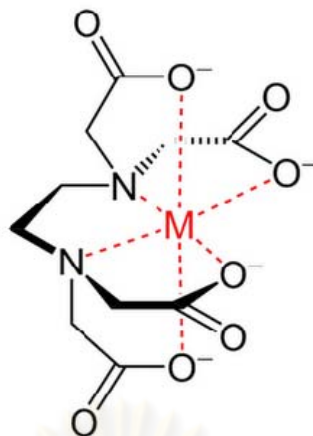
การรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ EDTA กับอิออนของธาตุโลหะหนักซึ่งจะรวมกันได้ในอัตราส่วน 1:1 โดยไม่คำนึงว่า cation นั้นมีประจุเป็นเท่าไร ในสถานะที่สารละลายตัวกลางมีสภาพเป็นกรดขนาดกลาง EDTA และอิออนของโลหะจะเกิดปฏิกิริยาตามสมการดังนี้



หรือเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วๆ ไปคือ



ทั้งนี้ EDTA ควรอยู่ในสภาพที่มีสารประกอบตัวกลางมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6 ถึง 10 และเพื่อความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น EDTA จึงเลือกที่จะรวมตัวกับอิออนของธาตุโลหะที่มีประจุ 2+ (divalent metal ion) (Skoog และ West, 1979) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างธาตุโลหะกับ EDTA
(Skoog และ West, 1979)

2.8.2 ความเป็นพิษของสาร EDTA

สาร EDTA ไม่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ และหากหายใจเอาละอองฝุ่นของสาร EDTA เข้าไปอาจทำให้ไอหรือจาม การสัมผัสกับผิวหนังหรือลูกตาอาจทำให้ระคายเคืองต่อตาหรือแดงบริเวณผิวหนังที่สัมผัส แต่ถ้ากลืนหรือกินเข้าไปจะทำให้รู้สึกร้อนในกระเพาะหรือคลื่นไส้อาเจียน และหากได้รับในปริมาณมากอาจมีผลต่อไต ซึ่ง National Institute for Occupational Safety and Health, 2002 มีการศึกษาความเป็นพิษของสาร EDTA ต่อสัตว์ ซึ่งทำการทดสอบกับกระต่าย โดยใช้สาร EDTA 50% ทาไปหูนาน 20 ชั่วโมง พบว่า กระต่ายเกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย และเมื่อทำการทดสอบกับตาของกระต่าย โดยใช้สาร EDTA 50 มิลลิกรัม พบว่า ตาของกระต่ายเกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย มีอาการบวม น้ำ และเลือดออกหลังจากการทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (BASF AG, 1973) และ Dufkova et al. (1984) ศึกษาพิษของไฮโดรเจนอีดีทีเอ (H_2EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 310 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สาหร่ายชนิด *Scenedesmus quadricauda* ผลการทดลอง พบว่า H_2EDTA มีผลทำให้สาหร่ายมีมวลชีวภาพลดลง เกิดการยับยั้งการแบ่งเซลล์ และการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ลดลง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Srivastara (1985) ทำการศึกษาระดับของฟิเอช ความเข้มข้นของโครเมียม และปริมาณของซีลีเนียมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ โดยความเข้มข้นของโครเมียมที่ใช้ คือ 1, 5, 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซีลีเนียมที่ใช้ 1, 5, 10, 25 และ 50 กรัม โดยนำซีลีเนียมใส่ในน้ำเสีย กวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบต่อนาที นาน 6 ชั่วโมง แล้วเก็บน้ำที่ 0, 30, 60, 180 และ 360 นาที การศึกษาพบว่า การกำจัดโครเมียมเกิดได้ดีที่ฟิเอชต่ำคือ ประมาณ 2.8 ซึ่งสามารถดูดซับโครเมียมได้ถึง 0.415 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่ผ่านซีลีเนียมจะมี ฟิเอช เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 8.5-9 ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำคือ 1-5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ความสามารถในการกำจัดโครเมียมได้สูงขึ้น หากแต่ในกรณีน้ำเสียมีความเข้มข้น ของโครเมียมสูงๆ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด จะมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม Bhargava (1987) ได้ทำการศึกษาวิจัยซีลีเนียมที่หาง่ายราคาถูก สามารถนำมากำจัดโครเมียม ตะกั่ว และแคดเมียม ที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาแบบแบดซ์ และเป็นการศึกษาที่ใช้น้ำหนักซีลีเนียมต่างๆ ได้แก่ 1, 5, 10, 25 และ 50 กรัม กวนกับน้ำที่มีความเข้มข้นของโครเมียม ตะกั่ว และแคดเมียมต่างๆ ได้แก่ 1, 5, 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า โครเมียม ตะกั่ว และแคดเมียม ที่มีความเข้มข้นต่ำซีลีเนียมสามารถกำจัดโลหะหนักดังกล่าวได้ในอัตราร้อยละ 55-75, 6-30 และ 0-7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโครเมียมถูกซีลีเนียมจับได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับตะกั่ว และแคดเมียม

Tan (1988) ศึกษาการใช้ไบซาในการดูดซับตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ซึ่งจำนวนของการดูดซับขึ้นอยู่กับฟิเอช, ไอออนิก สเตรนจ์ (ionic strength) ความเข้มข้นของโลหะหนัก ความเข้มข้นของสารรบกวนสารลดแรงตึงผิวโดยพบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่ว แคดเมียม และ สังกะสี ของไบซาเป็น 0.38, 0.28 และ 0.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้การทดลองโดยใช้คอลัมน์ (column) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้เกือบร้อยละร้อย สำหรับตะกั่ว 100 ส่วนในล้านส่วน ที่ฟิเอชเท่ากับ 6 และไบซา 1.8 กรัม อัตราการไหลเท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่ามีความสามารถในการดูดซับตะกั่ว > แคดเมียม > สังกะสี ตามลำดับ

Gupta *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ [Cr(VI)] จากน้ำเสียด้วย green algae (*spirogyra species*) ซึ่ง *Spirogyra* เป็นสาหร่ายสีเขียว โดยทำการทดลองแบบแบดซ์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของมวลชีวภาพ และศึกษาความสามารถในการดูดซับจากการศึกษาพบว่า *Spirogyra* มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่ฟิเอชเท่ากับ 2 และสามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด คือ 14.7×10^3 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้งของมวล

ชีวภาพ ภายในเวลา 120 นาที จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้มวลชีวภาพ *Spirogyra* มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้ และสามารถนำไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นในการบำบัด และฟื้นฟูน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้

ปริดา นันทพุลทรัพย์ (2544) ศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตซาน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับ เมื่อมีการแปรค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว, ความเข้มข้นของสารละลาย EDTA การศึกษาผลของ EDTA ที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตซาน โดยใช้ไคโตซาน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เมื่อเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนโดยโมลกับตะกั่ว จะได้ปริมาณตะกั่วต่อ EDTA เท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ) พีเอชเริ่มต้นที่ 4, 5, 6, 7 และ 8 โดยที่ทดลองทั้งหมดเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่าพีเอช มีผลต่อการดูดซับ โดยที่พีเอช เริ่มที่ 4 ไคโตซานจะมีความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุด เมื่อพีเอช เริ่มต้นในการทดลองสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของไคโตซานก็จะเพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการดูดซับมากที่สุดที่พีเอชเริ่มต้นที่ 8 (ในการทดลองใช้พีเอช เริ่มต้นในช่วง 4-8) การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของไคโตซาน (adsorption capacity มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของตะกั่วต่อกรัมของไคโตซาน) เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติม EDTA ซึ่งเป็นสารคีเลต (chelating agent) ลงไปในสารละลายตะกั่ว พบว่า การดูดซับที่พีเอช ต่างๆ จะเปลี่ยนไป โดยที่ความสามารถในการดูดซับที่พีเอชต่ำกว่า 5 จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนความสามารถในการดูดซับที่พีเอชสูงกว่า 5 จะมีค่าลดลง เนื่องจากตะกั่วสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ทำให้รูปแบบของตะกั่วในน้ำเปลี่ยนจากไอออนตะกั่วที่มีประจุเป็นบวก (Pb^{2+}) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับ EDTA ที่มีประจุเป็นลบ [$Pb(EDTA)^{-2}$] โดยที่ตะกั่วทั้ง 2 รูปแบบมีกลไกในการดูดซับด้วยไคโตซานต่างกัน

วิมลรัตน์ สังข์คุ้ม (2545) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก 4 ชนิด คือ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม โดยใช้สาหร่ายช่อพริกไทย ซึ่งเป็นสาหร่ายทะเล การทดลองในเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงช่วงของค่าพีเอชที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับ ซึ่งเป็นช่วงพีเอช ที่โลหะหนักต่างๆ เหล่านี้สามารถละลายอยู่ในรูปของสารละลายได้ การทดสอบการชะล้างด้วยน้ำร้อน และ EDTA แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักไม่สามารถถูกชะล้างด้วยน้ำร้อน แต่สามารถถูกชะล้างได้ดีด้วย EDTA สำหรับขนาดของสาหร่ายมีผลต่อการดูดซับสังกะสี โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของสาหร่ายเล็กลง ซึ่งไม่เกิดขึ้นกับโลหะอื่นๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสังกะสีด้วยมวลชีวภาพน่าจะเกิดขึ้นกับตำแหน่งเป้าหมายบนสาหร่ายที่แตกต่างจากโลหะอื่นๆ นอกจากนี้การศึกษายังพบว่า โลหะ

ส่วนมากสามารถถูกดูดซับได้ดีที่ค่าพีเอชสูงขึ้น ยกเว้นการดูดซับตะกั่วที่มีการดูดซับเป็นไปได้ดีในช่วงค่าพีเอชต่ำ และเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นจะให้ค่าการดูดซับที่ต่ำลง และพบว่าการดูดซับของโลหะทั้ง 4 เป็นไปตามไอโซเทอมของ Langmuir

จรรยาพร พุ่มงาม (2545) ศึกษาวิจัยเรื่องการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครง และเปลือกหอยแมลงภู่ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ภายในประเทศมาใช้กำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับและใช้สมการฟรอนด์ลิช (Freundlich) ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเปลือกหอยโดยการทดสอบแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ ผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่าเปลือกหอยแครงซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และรูพรุน รวมทั้งปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มากกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ โดยเปลือกหอยแครงมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ นอกจากนี้ผลของการนำเปลือกหอยขนาดต่างกันไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 mesh ซึ่งนำไปตากแดดสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด โดยมีค่าคงที่การดูดซับของฟรอนด์ลิช (freundlich) เท่ากับ 9.46×10^5 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมของเปลือกหอย โดยการกำจัดตะกั่วเกิดได้ดีในช่วงพีเอชเท่ากับ 6.3-8.8 และประสิทธิภาพพลดลงเมื่อพีเอชลดลง สำหรับกลไกการกำจัดเกิดจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงตามด้วยการตกผลึกของ Cerussite (PbCO_3) และถูกดูดซับบริเวณผิวหน้าของเปลือกหอย สำหรับการทดสอบแบบต่อเนื่องในการทดสอบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของตะกั่ว 5.98 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร บรรจุเปลือกหอยแครงสูง 23 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วได้ 6 ลิตร ก่อนที่น้ำผ่านคอลัมน์จะมีความเข้มข้นตะกั่วสูงเกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ และความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่องหรือแบบคอลัมน์เท่ากับ 8.6 มิลลิกรัมต่อกรัมเปลือกหอยแครง

เอมมา อาสนจินดา (2545) ได้ทำการวิจัยถึงผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยโคโตซานแบบโครงร่างตาข่าย โดยการทดลองแบบแบตช์ และคอลัมน์ ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว และความเข้มข้นของสารคีเลต คือ อีดีทีเอ (EDTA), เอ็นทีเอ (NTA) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) ผลการทดลองแบบแบตช์ พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยโคโตซานแบบโครงร่างตาข่ายสูงขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้น และการเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วทำให้ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อปริมาณโคโตซานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับผลการศึกษาสารคีเลต พบว่า เมื่อเติม EDTA และ NTA ลงไปในน้ำเสีย

สังเคราะห์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับด้วยไคโตซานแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอชสูงลดลง ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่พีเอชต่ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปประจุลบ จึงทำให้เกิดการดูดซับกับไคโตซานที่พีเอชต่ำซึ่งอยู่ในรูปประจุบวกได้ดีกว่า ส่วนการเติมกรดทาทริกกลงไปในสารละลายตะกั่ว พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตซานแบบโครงร่างตาข่ายไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือ ที่พีเอชสูงไคโตซานแบบโครงร่างตาข่ายยังคงมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วได้ดีกว่าที่พีเอชต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่ว และไคโตซานเป็นพันธะคีเลต เช่นเดียวกับพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างตะกั่วกับไคโตซาน โดยต่างจากพันธะที่เกิดกับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับ EDTA และตะกั่วกับ NTA ที่เป็นพันธะซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า สำหรับผลการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ภายในปริมาตร 88.89 ปริมาตรเบด ซึ่งใช้เวลาเข้าสู่ภาวะสมดุลมากกว่าการทดลองแบบแบตช์ 13.5 เท่า โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด 91.40 เปอร์เซ็นต์

จารุรัตน์ เชาว์เลิศ (2546) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสีย จากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วยเกล็ดไคโตซาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เกล็ดไคโตซานที่สกัดจากเปลือกกุ้งในการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช ในช่วงระยะเวลาของการศึกษานี้ น้ำเสียมีการปนเปื้อนของตะกั่ว และปรอทอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.2-3.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2.7-88.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การบำบัดน้ำเสียเริ่มจากการปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 6 ใช้เกล็ดไคโตซานขนาด 710-850 ไมโครเมตร ในปริมาณ 20 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร กวนที่ความเร็วเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยพบว่า สามารถกำจัดตะกั่ว และปรอทได้ประมาณร้อยละ 94.95 ± 0.01 และ 95.27 ± 0.07 ตามลำดับ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) ในขั้นตอน อินทราพาร์ติเคิล ดิฟฟิวชัน (intraparticle diffusion) ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมให้ค่าสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว และในน้ำเสียจริงด้วยไคโตซาน มีความสามารถในการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุดเท่ากับ 1,430 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตซาน และ 1,000 มิลลิกรัมปรอทต่อกรัมไคโตซาน ตามลำดับ ซึ่งเป็นการอธิบายกลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยสมการแลงมัวร์ (langmuir) ให้ความสัมพันธ์ที่ดีกว่าด้วยสมการฟรุนดลิช (freundlich)

Sampanpanish (2006) ได้ศึกษาเรื่องการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการใช้พืช และการดูดซับทางชีวภาพเป็นการใช้เทคโนโลยีในการฟื้นฟูสภาพพื้นที่ที่ปนเปื้อนโครเมียมในดินและน้ำ การศึกษาได้นำต้นวัชพืชที่มีในประเทศไทยชนิดต่างๆ มาทดสอบ ได้แก่ หญ้าแพรก ต้นขลุ่ ต้น

ก้างปลา หญ้าข้าวนก หญ้าแฝก และต้นผักขม โดยนำวัชพืชดังกล่าวในรูปของมวลชีวภาพ มาทำการศึกษาแบบแบตช์ไฮโซโทมและการศึกษาบนคอลัมน์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ไบของต้นก้างปลา ต้นขลุ่ย และหญ้าแพรกมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมดีที่สุดในน้ำเสียเท่ากับ 53, 45 และ 37 มิลลิกรัมต่อกรัมมวลชีวภาพ ตามลำดับที่พีเอชเท่ากับ 2 ณ เวลาสมดุลที่ 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า ไบของต้นขลุ่ยมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดีที่สุด เท่ากับ 51.3 มิลลิกรัมต่อกรัมมวลชีวภาพที่พีเอชเท่ากับ 2 ณ เวลาสมดุลที่ 102 ชั่วโมง อัตราการไหล 1.3 มิลลิตรต่อนาที อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากวัชพืชในดินและมวลชีวภาพในน้ำพบว่า ไบของต้นขลุ่ยมีความสามารถในการสะสม และดูดซับได้ดีกว่าส่วนของราก และส่วนของต้น และเป็นวัชพืชหรือมวลชีวภาพที่มีความสามารถมากกว่ามวลชีวภาพชนิดอื่นๆ ดังนั้น ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าไบของต้นขลุ่ยมีศักยภาพ และคุณสมบัติในการสะสม และการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ดีที่สุด

Erol *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ walnut, hazelnut and almond shell เป็นมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไอออนในน้ำเสีย โดยใช้เปลือกของ Walnut (WNS) (*Juglans regia*), Hazelnut (HNS) (*Corylus avellana*) และ Almond (AS) (*Prunus dulcis*) โดยได้ทำการทดลองแบบแบตช์ การทดสอบการดูดซับได้กำหนดเวลา และระดับความเข้มข้น และทำการเขย่าสารละลายโครเมียมจนถึงสมดุลภายในเวลา 100 นาที ประสิทธิภาพของมวลชีวภาพของเปลือกชนิดต่างๆ นี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำเสีย โดยค่าพีเอชเริ่มต้น คือ พีเอชเท่ากับ 3.5 ผลการศึกษา พบว่า โดยการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไอออน สามารถดูดซับได้ดีที่ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 2.0 และ 3.5 นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวัสดุทางชีวภาพที่นำมาทำเป็นมวลชีวภาพด้วย ทั้งนี้ค่าพีเอชที่เหมาะสมของมวลชีวภาพทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ พีเอชเท่ากับ 3.5 สำหรับ (WNS), พีเอช 3.5 สำหรับ (HNS) และพีเอช 3.2 สำหรับ (AS) นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบว่า การดูดซับที่ดีที่สุดนั้นเป็นการใช้ไฮโซโทมแบบแลงมัวร์ (langmuir) โดยการทดลองแสดงถึงความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไอออน ของ WNS, HNS และ AS เท่ากับ 8.01, 8.28 และ 3.40 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ WNS , HNS และ AS ได้เท่ากับ 85.32, 88.46 และ 55.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์คือ 0.5 มิลลิโมลาร์ ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกของ Hazelnut (HNS) นั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย

Ertugayand *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียด้วยมวลชีวภาพของเห็ดกระดุมทองหรือเห็ดแชมปิญอง (*Agaricus bisporus*) ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมความเร็วของการเขย่า ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะไอออน และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และไอโซเทอมที่เหมาะสมเปรียบเทียบ 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (freundlich) และแบบแลงมัวร์ (langmuir) ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดของมวลชีวภาพเห็ดกระดุมทองคือ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความเร็วของการเขย่าคือ 150 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ คือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบว่าการใช้มวลชีวภาพเห็ดกระดุมทองในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เหมาะสมกับไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (freundlich) มากกว่าแบบแลงมัวร์ (langmuir)

สุปราณี บุระ และคณะ (มปป.) ได้ศึกษาค้นคว้ากำจัดโครเมียมไตรวาเลนต์ และโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้มวลชีวภาพจากสาหร่าย *สไปรูลินา* (*Spirulina*) และ *คลอเรลลา วูลกาเรีย* ที่ *ไคลอริส* (*chlorella vulgaris tistr*) ทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคไอออนอินเตอร์แอ็คชันโครมาโทกราฟี และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายทั้งสามชนิดสามารถกำจัดโครเมียมได้เป็นที่น่าพอใจ แต่ได้เลือก *สไปรูลินา* เพียงชนิดเดียวเพื่อศึกษาในขั้นต่อไป ทั้งนี้เพราะ *สไปรูลินา* สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดีที่สุด จากกระบวนการดูดซับที่ได้พัฒนาแล้วพบว่าโครเมียมไตรวาเลนต์ ถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ที่พีเอชเท่ากับ 8 (100 เปอร์เซ็นต์) ภายในเวลา 15 ชั่วโมง ด้วยค่าการกำจัดเท่ากับ 41.2 มิลลิกรัมของโลหะต่อน้ำหนักเปียกเป็นกรัมของมวลชีวภาพ ในขณะที่โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ถูกกำจัดได้ดีที่พีเอชเท่ากับ 2 โดยถูกกำจัดได้ประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 5 วัน โดยมีค่าปริมาณโลหะต่อน้ำหนักของมวลชีวภาพเท่ากับ 36.6 มิลลิกรัมของโลหะต่อน้ำหนักเปียกเป็นกรัมของมวลชีวภาพ โดยในการทดลองขั้นต่อมา คือ ทำการใส่สาร EDTA ลงไปเพื่อช่วยในการดูดซับโครเมียม โดยให้มีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และใส่สาร EDTA ในปริมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเขย่าที่ 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองพบว่า เมื่อใส่สาร EDTA ลงไปแล้วสามารถช่วยดูดซับโครเมียมได้มากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการศึกษา

3.1 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และความสามารถของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาร EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) ช่วยในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

3.1.1 การเตรียมมวลชีวภาพจากต้นและใบของสับปะรด

ในการศึกษานี้ใช้ต้น และใบของสับปะรดเป็นวัตถุดิบในการผลิตมวลเพราะเป็นวัสดุเหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว (แสดงดังรูปที่ ก1 ในภาคผนวก ก)

การเตรียมมวลชีวภาพที่ผลิตจากต้นและใบของสับปะรด เริ่มต้นด้วยการนำต้นและใบของสับปะรดที่เหลือทิ้งแล้วมาล้างด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้งเพื่อทำความสะอาดและล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งเพื่อล้างสิ่งสกปรกต่างๆ จากนั้นนำไปตากทิ้งไว้ให้แห้งในที่ร่มอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำต้น และใบของสับปะรดมาตัด หรือหั่นให้ได้ชิ้นเล็กพอประมาณเพื่อง่ายต่อการอบ (แสดงดังรูปที่ ก2 ในภาคผนวก ก) จากนั้นนำมาห่อด้วยกระดาษฟอยล์เพื่อนำไปอบแห้งในตู้อบ (oven) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2-3 วัน (แสดงดังรูปที่ ก3 ในภาคผนวก ก) เมื่ออบเสร็จแล้วนำมาบดให้ละเอียด แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรง โดยให้ได้ขนาด 2-3 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้นเดซิเคเตอร์ (desiccator) (ดังรูปที่ ก4, ก5 และ ก6 ในภาคผนวก ก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

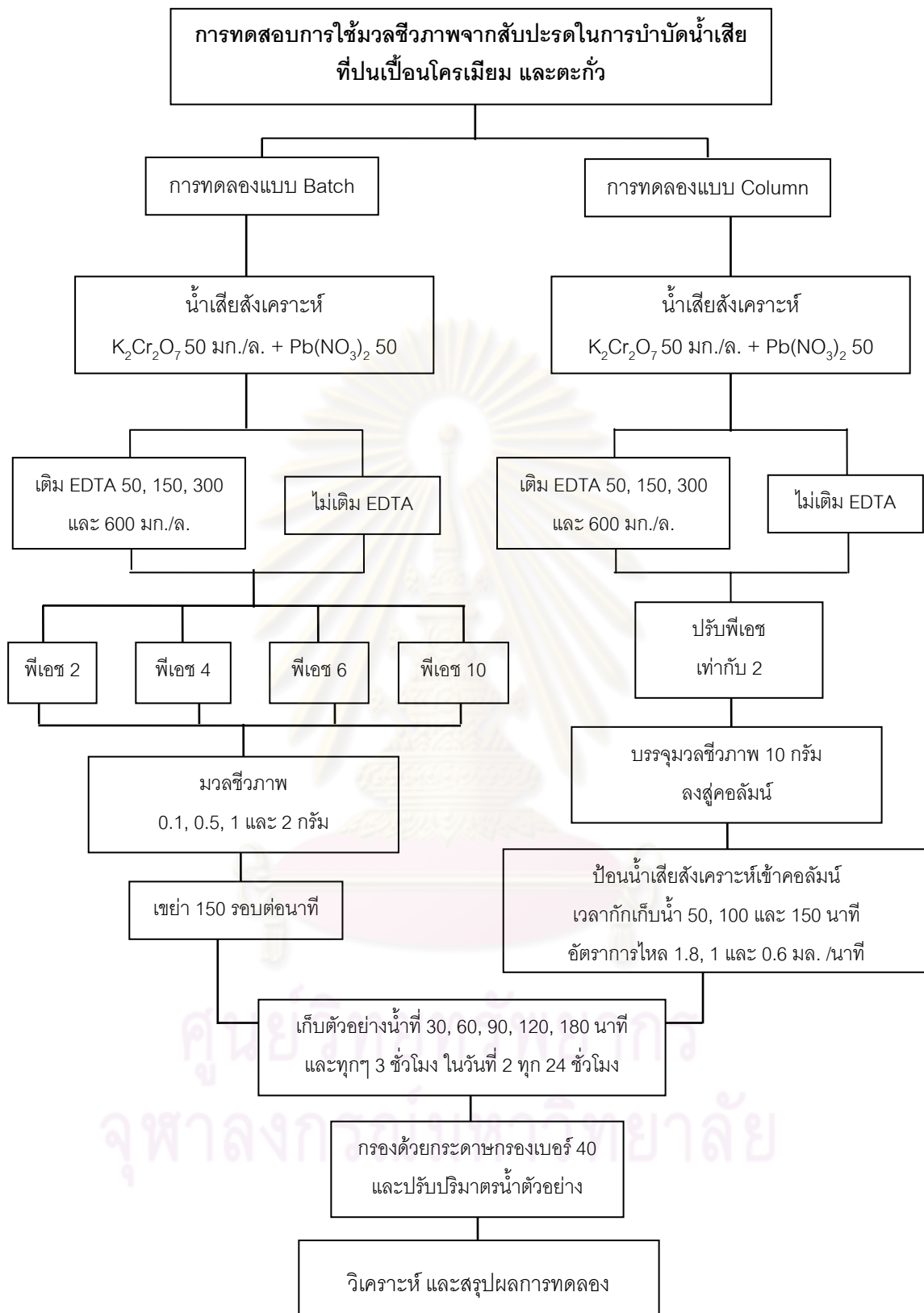
3.1.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนโครเมียม เตรียมได้จากโพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate; $K_2Cr_2O_7$) ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว เตรียมได้จากตะกั่ว(II)ไนเตรต (lead(II)nitrate; $Pb(NO_3)_2$) ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ก7 ในภาคผนวก ก

สำหรับแผนผังการทดลองทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการทดลอง

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) กระดาษกรองเบอร์ 40
- 2) เครื่องปั่นมวล์ชีวภาพ (blender)
- 3) เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter)
- 4) ตะแกรงแยกขนาด (sieve)
- 5) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งพิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S ยี่ห้อ Sartorius (balance)
- 6) ตู้อบความร้อน (hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
- 7) โถบ่งกันความชื้น (dessicator)
- 8) เครื่องเขย่า (shaker)
- 9) คอลัมน์อริลิก (acrylic column) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร
- 10) ปิเปต (pipet)
- 11) ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
- 12) บีกเกอร์ (beaker)
- 13) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างขนาด 60 มิลลิลิตร
- 14) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างขนาด 120 มิลลิลิตร
- 15) ขวดวัดปริมาตร (volume metric flask)
- 16) กระจกตวง (cylinder)
- 17) ปั๊มแบบ Perlistatic pump
- 18) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE
- 19) เครื่องยูวี-สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer)
- 20) เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชัน สเปคโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer; AAS) รุ่น anslyst 800, perkin Elmer
- 21) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- 22) ตะกั่วไนเตรต ($[(Pb(NO_3)_2)]$)
- 23) สาร EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)
- 24) สารไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1, 5 diphenylcarbazide)
- 25) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 26) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4)
- 27) พาราฟิล์ม (parafilm)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การทดลองแบบแบตช์ (batch experiment)

วิธีการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1.1 ศึกษาผล EDTA และผลของ pH

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม และตะกั่ว อย่างละ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และเติมสาร EDTA ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50, 150, 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่เติมสาร EDTA ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่า pH เท่ากับ 2, 4, 6 และ 10 ตามลำดับ โดยการปรับค่า pH ด้วยสารละลายเบส NaOH หรือสารละลายกรด H_2SO_4 ตามความจำเป็น

2) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม และตะกั่ว อย่างละ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่า pH เท่ากับ 2, 4, 6 และ 10 ตามลำดับ ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาตรของแต่ละค่าของ pH อย่างละ 100 มิลลิลิตร

3) เติมมวลชีวภาพน้ำหนักรวม 2.0 กรัม ลงไปในขวดทุกใบ

4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5) แยกมวลชีวภาพออก โดยกรองผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 40 นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และตะกั่ว

6) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแล้วทำการวิเคราะห์หาค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดใน การกำจัดโครเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

โดยสามารถแสดงวิธีการทดลองได้ดังรูปที่ ก9 ในภาคผนวก ก

3.3.1.2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัส

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และตะกั่ว ความเข้มข้นอย่างละ 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ที่มีค่า pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.1.1.1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) เติมมวลชีวภาพน้ำหนักรวมที่แน่นอน 2.0 กรัม ลงไปในขวดทุกใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เวลาเปลี่ยนแปลง 15, 30, 60, 90, 120, 180 นาที และ ทุกๆ 3 ชั่วโมง ในวันที่ 2 เก็บทุก 24 ชั่วโมงจนกระทั่งถึงจุดสมดุลเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของการดูดซับ
- 4) แยกมวลชีวภาพออก โดยกรองผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 40 นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และตะกั่ว
- 5) นำค่าที่วัดได้ที่จุดสมดุลไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.3.1.3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และตะกั่ว ความเข้มข้นอย่างละ 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ที่มีค่า pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.1.1.1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) เติมมวลชีวภาพ น้ำหนักแน่นอน 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัม ลงในแต่ละขวด
- 3) นำขวดแต่ละใบ ไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาสัมผัสที่จุดสมดุลที่วัดได้จากข้อ 3.1.1.2
- 4) แยกมวลชีวภาพออก โดยกรองผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 40 นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และตะกั่ว
- 5) นำค่าที่ได้ไปทำการเขียนกราฟ และวิเคราะห์ผล

3.3.2 การทดลองแบบคอลัมน์ (column experiment)

การทดลองโดยใช้คอลัมน์ชนิดอะคริลิก (acrylic column) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร (แสดงดังรูปที่ ก10 (ก) ในภาคผนวก ก) ทั้งนี้การทดลองมีการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียม และตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าสู่คอลัมน์แบบไหลขึ้นอย่างต่อเนื่อง (up flow-fed) โดยใช้ปั๊มชนิด Peristaltic pumps ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ได้ (แสดงดังรูปที่ ก11 ในภาคผนวก ก)

วิธีการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียม และตะกั่วอย่างละ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) เตรียมสาร EDTA ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50, 150, 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมทั้งชุดที่ไม่เติมสาร EDTA
- 3) ทำการปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ คือ พีเอชเท่ากับ 2
- 4) บรรจุมวลชีวภาพลงในคอลัมน์ในปริมาณ 10 กรัม (แสดงดังรูปที่ ก10 (ข) ในภาคผนวก ก)
- 5) ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้เข้าสู่คอลัมน์ โดยควบคุมให้ระบบมีเวลากักเก็บน้ำที่ 50, 100 และ 150 นาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการไหลเท่ากับ 1.8, 1 และ 0.6 มิลลิตรต่อนาทีตามลำดับ
- 6) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำหลังจากผ่านการบำบัดแล้วมาปรับปริมาตร และทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก โดยในวันแรกทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180 และทุกๆ 3 ชั่วโมง และหลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมงจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (แสดงดังรูปที่ ก12 ในภาคผนวก ก)

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.1 การวิเคราะห์หาค่าโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ในตัวอย่างน้ำ ใช้วิธีการของ USEPA method 7196A (USEPA, 1992) (แสดงดังภาคผนวก ค) โดยนำตัวอย่างน้ำไปวัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ด้วยเครื่อง UV-Spectro photometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 540 นาโนเมตร (แสดงดังรูปที่ ก13 และก14 ในภาคผนวก ก)

3.4.2 การวิเคราะห์หาโครเมียม และตะกั่วในตัวอย่างน้ำ ใช้วิธีการของ USEPA method 3015A (USEPA, 1998) (แสดงดังภาคผนวก ค) โดยนำตัวอย่างน้ำมาย่อยด้วยกรด (acid digestion) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (microwave) (แสดงดังรูปที่ ก15 ในภาคผนวก ก) และตรวจวัดหาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) (แสดงดังรูปที่ ก16 ในภาคผนวก ก)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษานี้เป็นการทดลองใช้มวลชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากต้น และใบของสับปะรด เพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักคือ โครเมียม และตะกั่ว ด้วยกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) โดยทำการเตรียมมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตร และนำมาทดลองดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักคงที่ตลอดการทดลองได้แก่ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่มีระดับความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และตะกั่วมีระดับความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งการรายงานผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลองในครั้งนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การทดลองแบบแบตช์ (batch experiment) เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก และการกำจัดโครเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ของมวลชีวภาพจากสับปะรด ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) เวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสาร EDTA และทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนดลิช

ส่วนที่ 2 คือ การทดลองแบบคอลัมน์ (column experiment) เป็นการศึกษาอัตราการไหล (flow rate) ของน้ำเสียที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก และการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว ในการทดลองนี้ มวลชีวภาพถูกนำไปใส่ไว้ในปริมาณที่คงที่ และมีการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านตัวกลางหรือผ่านชั้นของมวลชีวภาพ โดยทำการป้อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของมวลชีวภาพจากสับปะรด

เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงการปนเปื้อนของโลหะหนัก ที่อ้างอิงจากการปนเปื้อนในบริเวณพื้นที่จริง โลหะหนักที่เกิดการปนเปื้อนคือ โครเมียม และตะกั่ว ดังนั้นการศึกษานี้ จึงได้ทำการทดลองในลักษณะที่คล้ายกับการปนเปื้อนในพื้นที่จริงคือ การศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนทั้งโครเมียม และตะกั่ว ซึ่งสารเคมีที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ $K_2Cr_2O_7$ และ $[Pb(NO_3)_2]$ ซึ่งเมื่อสารเคมีทั้งสองชนิดรวมตัวกันแล้วจะทำให้เกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้นดังสมการ $Pb(NO_3)_2 + K_2Cr_2O_7 \rightarrow PbCr_2O_7 (s) + 2KNO_3 (aq)$ ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้จึงต้องทำการ

ทดลองควบคุมเพื่อให้ทราบว่าความเข้มข้นของทั้งโครเมียม และตะกั่วที่เติมลงไปนั้น เมื่อสารเคมีทั้งสองชนิดรวมกัน และหลังจากตกตะกอนแล้ว จึงนำความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายมาคิดเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นในการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวของมวลชีวภาพซึ่งรายละเอียดผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองแบบแบตช์ (batch experiment)

4.1.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของมวลชีวภาพจากสับปะรด

1) ผลของสาร EDTA และผลของ pH

จากการทดลองถึงการตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่ว ที่ pH ต่างๆ และที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ EDTA พบว่า ในทุกๆ ความเข้มข้นของ EDTA เมื่อคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แล้ว ให้ค่าการตกตะกอนไม่แตกต่างกันที่ pH ทุกๆ ค่า แต่เมื่อเปรียบเทียบจากค่าเฉลี่ย (mean) แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าของ pH เพิ่มขึ้นการตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วจะมีค่าลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และที่ pH เท่ากับ 2 ทั้งโครเมียม และตะกั่วจะมีค่าการตกตะกอนมากที่สุด ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1-4.6

วิธีการคำนวณการตกตะกอน (%) คือ

% การตกตะกอน =

$$\frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก} - \text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก}} \times 100$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่ไม่เติม EDTA (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L)

โลหะหนัก	pH	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
โครเมียม	2	18.33	19.72	18.20	18.75	62.50
	4	20.84	20.38	20.16	20.46	59.08
	6	21.46	21.84	21.67	21.67	56.67
	10	23.56	23.48	23.52	23.52	52.96
ตะกั่ว	2	19.34	20.14	19.42	19.63	60.73
	4	19.48	20.56	20.63	20.22	59.56
	6	21.06	21.09	21.25	21.13	57.74
	10	22.42	21.97	22.08	22.16	55.68

ตารางที่ 4.2 การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 50 มิลลิกรัม/ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L)

โลหะหนัก	pH	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
โครเมียม	2	17.76	16.54	16.51	16.94	66.13
	4	19.87	18.88	19.85	19.53	60.93
	6	20.15	21.87	22.46	21.49	57.01
	10	25.56	24.59	25.36	25.17	49.66
ตะกั่ว	2	18.4	18.51	18.45	18.45	63.09
	4	19.62	19.68	19.83	19.71	60.58
	6	20.14	21.02	21.06	20.74	58.52
	10	23.48	24.01	24.67	24.05	51.89

ตารางที่ 4.3 การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L)

โลหะหนัก	pH	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
โครเมียม	2	17.74	16.98	17.76	17.49	65.01
	4	18.78	18.07	18.53	18.46	63.08
	6	19.79	20.09	21.96	20.61	58.77
	10	23.67	24.73	23.44	23.95	52.11
ตะกั่ว	2	16.54	16.72	17.35	16.87	66.26
	4	19.71	19.87	18.79	19.46	61.09
	6	20.64	21.04	20.53	20.74	58.53
	10	24.84	25.98	26.73	25.85	48.30

ตารางที่ 4.4 การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 300 มิลลิกรัม/ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L)

โลหะหนัก	pH	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
โครเมียม	2	19.83	18.68	19.39	19.30	61.40
	4	20.93	21.72	20.78	21.14	57.71
	6	23.48	24.59	24.27	24.11	51.77
	10	26.81	25.77	26.32	26.30	47.40
ตะกั่ว	2	20.08	18.26	20.72	19.69	60.63
	4	21.09	21.73	21.83	21.55	56.90
	6	23.04	24.94	23.40	23.79	52.41
	10	25.79	26.38	25.78	25.98	48.03

ตารางที่ 4.5 การตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่วที่ pH ต่างๆ ที่เติม EDTA 600 มิลลิกรัม/ลิตร (ความเข้มข้นโครเมียม และตะกั่วเริ่มต้น = 50.0 mg/L)

โลหะหนัก	pH	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
โครเมียม	2	18.98	19.87	19.74	19.53	60.94
	4	20.07	20.48	19.89	20.15	59.71
	6	22.29	21.30	22.28	21.96	56.09
	10	24.73	23.64	24.65	24.34	51.32
ตะกั่ว	2	19.04	19.76	18.79	19.20	61.61
	4	21.48	20.71	20.63	20.94	58.12
	6	22.84	22.64	22.68	22.72	54.56
	10	25.83	24.86	25.67	25.45	49.09

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบการตกตะกอนของโครเมียม และตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของ EDTA ในแต่ละ pH

โลหะหนัก	pH	EDTA (mg/l)					Mean	SD
		0	50	150	300	600		
โครเมียม	2	62.50	66.13	65.01	61.40	60.94	63.20	2.2754
	4	59.08	60.93	63.08	57.71	59.71	60.10	2.0289
	6	56.67	57.01	58.77	51.77	56.09	56.06	2.5990
	10	52.96	49.66	52.11	47.40	51.32	50.69	2.2046
ตะกั่ว	2	60.73	63.09	66.26	60.63	61.61	62.46	2.3411
	4	59.56	60.58	61.09	56.90	58.12	59.25	1.7348
	6	57.74	58.52	58.53	52.41	54.56	56.35	2.7423
	10	55.68	51.89	48.30	48.03	49.09	50.60	3.2259

จากนั้นทำการศึกษาผลของ pH ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว โดยปรับให้มี pH เริ่มต้นที่ 2, 4, 6 และ 10 จากนั้นเติมมวลชีวภาพ 2.0 กรัมลงไป ในแต่ละขวดทดลอง และนำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่เวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น

- วิธีการคำนวณประสิทธิภาพการดูดติดผิวโลหะหนัก คือ

ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโลหะหนัก =

$$\frac{(\text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือจากการตกตะกอน} - \text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือหลังเติมมวลชีวภาพ}) \times 100}{\text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือจากการตกตะกอน}}$$

- วิธีการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก คือ

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก =

$$\frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก} - \text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือหลังเติมมวลชีวภาพ}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก}}$$

ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองมีดังนี้ (ตารางที่ 4.7- 4.8 และรูปที่ 4.1-4.5)

(1) ผลการดูดซับโครเมียม

ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ได้เติมสาร EDTA จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 นั้นแตกต่างกันคือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 44.16, 42.00, 31.24 และ 35.74 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวนั้นดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.06, 76.27, 70.20 และ 69.77 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 อันเนื่องมาจากการตกตะกอนด้วยนั่นเอง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 แล้ว แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 นั้นมีความเหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 44 ในขณะที่

ที่ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 79 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลอง
ขั้นต่อไป

ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 65.91, 64.88, 53.78 และ 55.45 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 88.45, 86.28, 80.13 และ 77.57 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 แล้ว แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2 จะเห็นได้ว่าที่ pH 2 มีความเหมาะสมมากที่สุดใน การกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 65 ในขณะที่ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีมากกว่าร้อยละ 88 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลอง
ขั้นต่อไปเช่นกัน

สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 92.38, 68.20, 66.54 และ 67.01 ตามลำดับ เห็น ได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.33, 88.26, 86.21 และ 84.20 ตามลำดับ ซึ่งมี ค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.1-4.2 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มี ความเหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณ ร้อยละ 92 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 97 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 300 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มี ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 42.26, 42.05, 40.30 และ 39.51 ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.71, 75.49, 71.21 และ 68.18 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่

pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.1-4.2 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 42 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 77 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

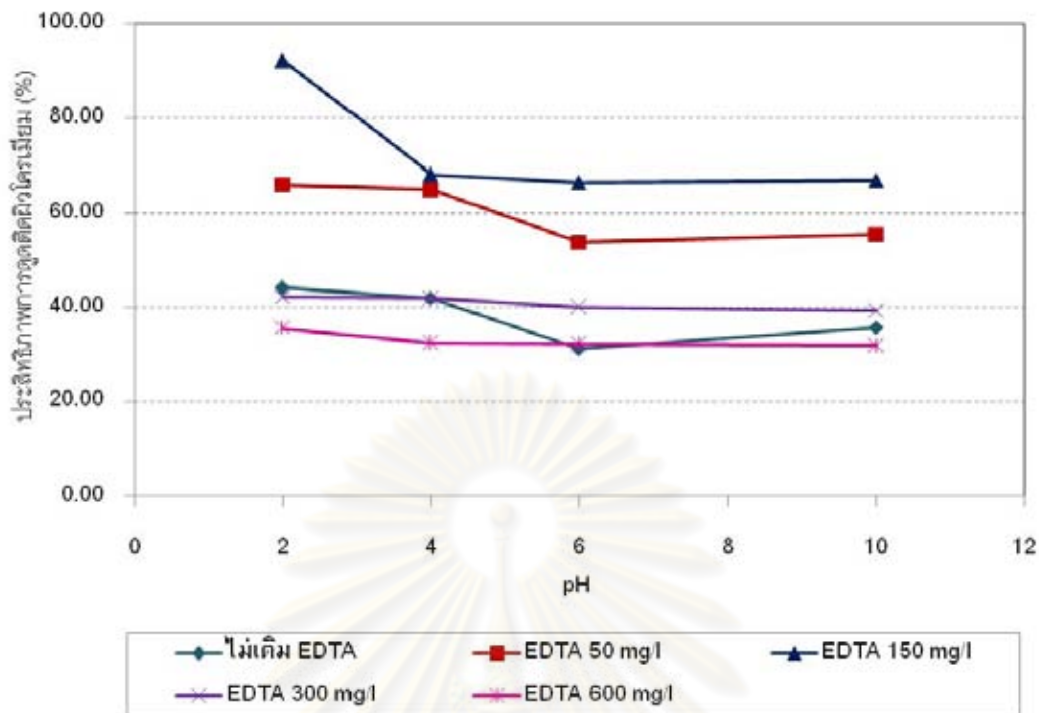
ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 600 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 35.69, 32.46, 32.23 และ 31.95 ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 74.88, 72.79, 70.24 และ 66.87 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.1-4.2 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 35 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 74 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป



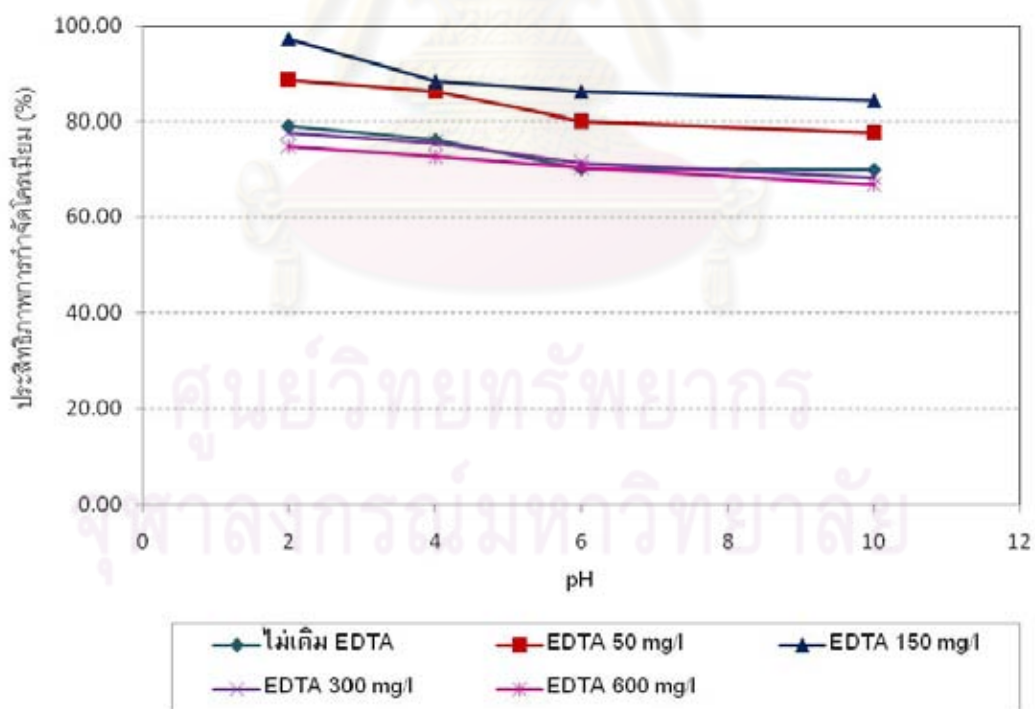
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ (ปริมาณมวลชีวภาพ = 2.0 g)

EDTA (mg/l)	pH	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ (%)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	การดูดติด ผิวโครเมียม	การกำจัด โครเมียม
0	2	10.42	9.95	11.04	10.47	44.16	79.06
	4	11.49	12.03	12.08	11.87	42.00	76.27
	6	14.93	14.89	14.88	14.90	31.24	70.20
	10	14.98	16.31	14.05	15.11	35.74	69.77
50	2	5.43	6.05	5.84	5.77	65.91	88.45
	4	6.03	7.28	7.27	6.86	64.88	86.28
	6	9.84	9.82	10.14	9.93	53.78	80.13
	10	10.39	12.85	10.40	11.21	55.45	77.57
150	2	1.32	1.21	1.47	1.33	92.38	97.33
	4	5.78	5.81	6.02	5.87	68.20	88.26
	6	6.32	6.41	7.96	6.90	66.54	86.21
	10	7.97	7.93	7.80	7.90	67.01	84.20
300	2	10.88	11.08	11.47	11.14	42.26	77.71
	4	12.02	12.35	12.39	12.25	42.05	75.49
	6	14.49	14.83	13.87	14.40	40.30	71.21
	10	15.76	16.14	15.83	15.91	39.51	68.18
600	2	12.85	11.93	12.90	12.56	35.69	74.88
	4	13.18	14.07	13.57	13.61	32.46	72.79
	6	13.93	14.87	15.84	14.88	32.23	70.24
	10	16.94	16.88	15.87	16.56	31.95	66.87



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ

(2) ผลการดูดซับตะกั่ว

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ได้เติม EDTA จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 นั้นแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 37.32, 31.44, 28.54 และ 25.75 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 75.39, 72.27, 69.80 และ 67.09 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 อันเนื่องมาจากการตกตะกอนนั่นเอง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.3-4.4 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 37 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 75 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 74.02, 65.31, 55.79 และ 49.43 ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ pH 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.41, 86.33, 81.66 และ 75.67 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.3-4.4 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 74 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 90 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

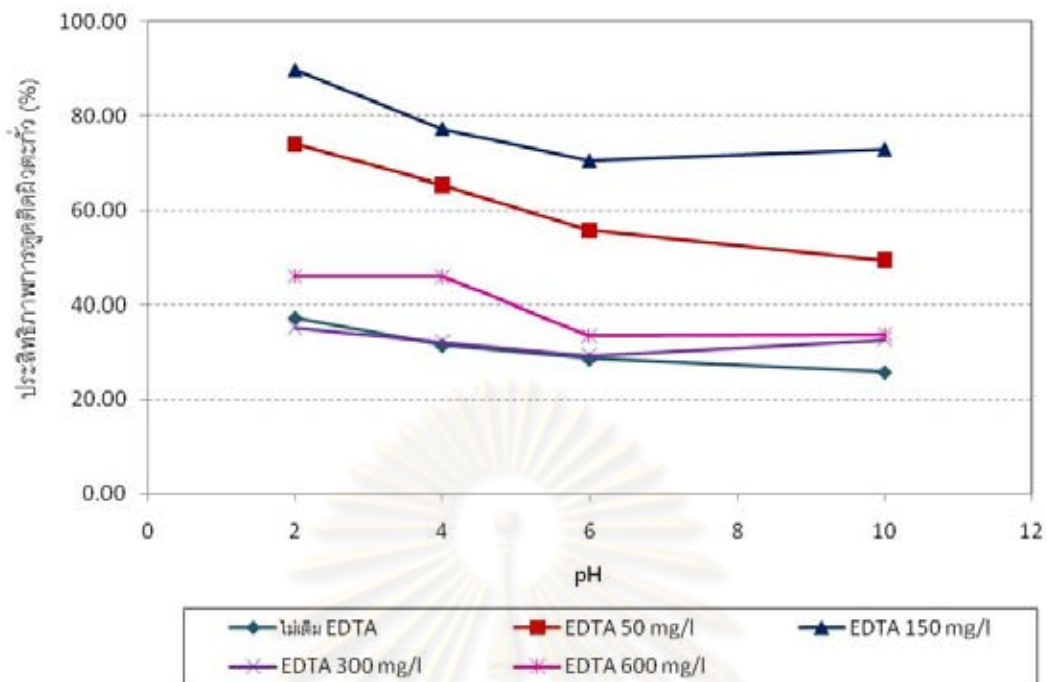
น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 89.96, 77.42, 70.62 และ 73.01 ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.61, 91.21, 87.81 และ 86.05 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.3-4.4 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 89 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 96 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 300 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 35.32, 32.30, 29.28 และ 32.75 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 นั้นมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 74.53, 70.82, 66.35 และ 65.05 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.3-4.4 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 35 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 74 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

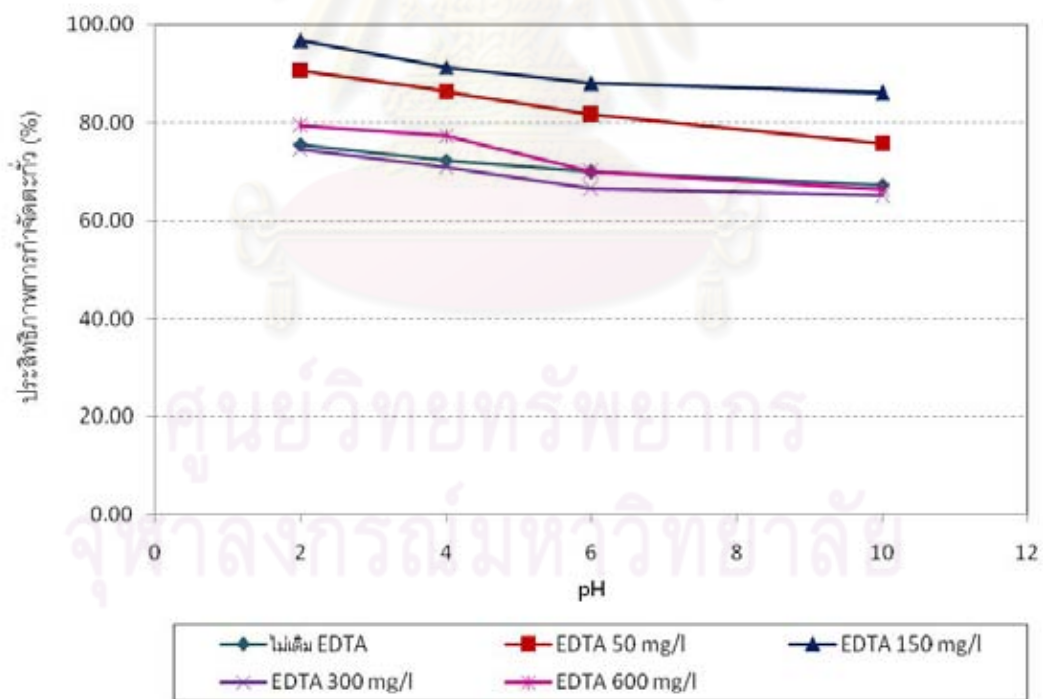
ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 600 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 นั้นมีความแตกต่างกัน คือ มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 46.08, 46.05, 33.58 และ 33.81 ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.30, 77.41, 69.82 และ 66.31 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ pH 2-10 แล้ว ดังรูปที่ 4.3-4.4 จะเห็นได้ว่าที่ pH เท่ากับ 2 มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงถึงประมาณร้อยละ 46 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 79 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ (ปริมาณมวลชีวภาพ = 2.0 g)

EDTA (mg/l)	pH	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ (%)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	การดูดติด ผิวตะกั่ว	การกำจัด ตะกั่ว
0	2	12.84	11.98	12.09	12.30	37.32	75.39
	4	12.98	13.78	14.83	13.86	31.44	72.27
	6	15.83	14.09	15.38	15.10	28.54	69.80
	10	15.84	16.73	16.79	16.45	25.75	67.09
50	2	4.07	4.29	6.02	4.79	74.02	90.41
	4	7.08	6.75	6.68	6.84	65.31	86.33
	6	9.29	9.46	8.76	9.17	55.79	81.66
	10	11.84	11.76	12.89	12.16	49.43	75.67
150	2	1.13	1.89	2.06	1.69	89.96	96.61
	4	4.89	4.32	3.97	4.39	77.42	91.21
	6	5.79	6.15	6.34	6.09	70.62	87.81
	10	5.13	7.82	7.98	6.98	73.01	86.05
300	2	12.59	12.46	13.15	12.73	35.32	74.53
	4	14.83	14.95	13.99	14.59	32.30	70.82
	6	16.96	16.68	16.84	16.83	29.28	66.35
	10	18.01	17.03	17.38	17.47	32.75	65.05
600	2	9.97	10.34	10.74	10.35	46.08	79.30
	4	10.88	11.43	11.58	11.30	46.05	77.41
	6	14.93	15.13	15.21	15.09	33.58	69.82
	10	16.84	16.36	17.34	16.85	33.81	66.31

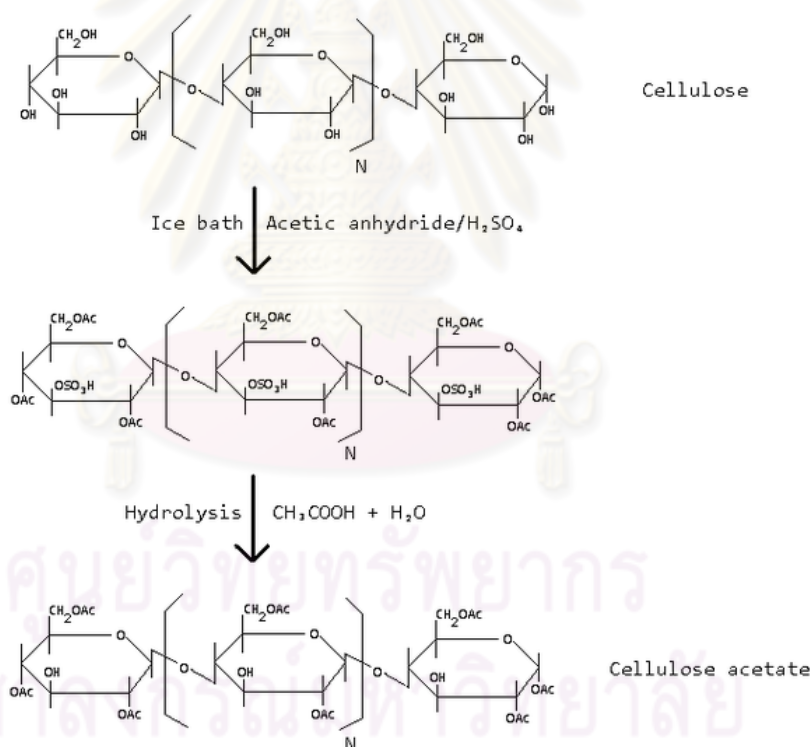


รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า pH กับประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว พบว่า pH มีผลต่อทั้งประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว โดยที่ pH ต่ำมวลชีวภาพจะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว ได้ดีกว่าที่ pH สูง ทั้งนี้เนื่องจากที่ pH ต่ำ มวลชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นโพลิเมอร์ประจุลบ (anion polymer) ดังนั้นไอออนบวกของโลหะหนัก สามารถจับกับประจุลบในโครงสร้างของเซลลูโลสที่อยู่ในมวลชีวภาพได้ดีกว่าที่ pH สูง (ดังรูปที่ 4.5) ในทางตรงกันข้ามที่ pH สูงนั้น โครงสร้างของเซลลูโลสจะมีความเป็นลบน้อยลง ทำให้โครเมียม และตะกั่วเข้าไปจับกับเซลลูโลสได้น้อยลง จึงส่งผลให้มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวน้อยลงตามไปด้วย จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sampanpanish (2006) ซึ่งพบว่า ใบของต้นก้างปลา ต้นขลุ่ย และหญ้าแพรงมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมดีที่สุดในลำดับที่ 53, 45 และ 37 มิลลิกรัมต่อกกรัมมวลชีวภาพ ตามลำดับ ที่ pH เท่ากับ 2 ณ เวลาสมดุลที่ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของเซลลูโลสในสภาพที่เป็นกรด

(http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cellulose_acetate_preparation.png)

จากการศึกษาผลของสาร EDTA ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย EDTA เท่ากับ 50, 150, 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่ 2, 4, 6 และ 10 จากการทดลอง พบว่า เมื่อมีสารละลาย EDTA เข้ามาเกี่ยวข้องกับในระบบ เซลลูโลสสามารถจับกับโลหะหนักได้ดีที่ pH ต่ำ เช่นเดียวกัน ในขณะที่งานวิจัยของเอมมา อาสนจินดา (2545) ซึ่งรายงานว่ เมื่อเติมสาร EDTA ลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ทำให้โคโคแซนแบบโครงร่างตาข่ายมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่ pH ต่ำ เนื่องจากเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นที่ประจุลบ จึงทำให้เกิดการดูดซับกับโคโคแซนที่ pH ต่ำ ซึ่งอยู่ในรูปประจุบวกได้ดีกว่า และงานวิจัยของปรีดา นันทพุลทรัพย์ (2544) พบว่า เมื่อมีการเติมสาร EDTA ลงไปในสารละลายตะกั่วที่ pH ต่างๆ พบว่า ความสามารถของโคโคแซนในการดูดซับตะกั่วได้ดี โดยมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นที่ pH ต่ำกว่า pH 5 ส่วนความสามารถในการดูดซับที่ pH สูงกว่า 5 จะมีค่าของการดูดซับตะกั่วลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ทำให้รูปแบบของตะกั่วในน้ำเปลี่ยนจากไอออนตะกั่วที่มีประจุเป็นบวก (Pb^{2+}) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับ EDTA ที่มีประจุเป็นลบ $[Pb (EDTA)^{-2}]$ โดยที่ตะกั่วทั้ง 2 รูปแบบมีกลไกในการดูดซับด้วยโคโคแซนต่างกัน

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่ว โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างที่ไม่ได้เติม และเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 50, 150, 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า เมื่อยังไม่ได้เติมสาร EDTA ลงไปนั้น มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วได้ในระดับหนึ่ง เมื่อเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 50 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ โดยที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วได้ดีที่สุด (อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อโครเมียม และตะกั่วมีค่าที่ใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้เนื่องจากสาร EDTA นั้นสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักทั้งสองชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้สามารถเข้าไปดูดติดกับมวลชีวภาพได้เช่นกัน ซึ่งคาดว่าลักษณะการดูดติดผิวที่เกิดขึ้น อาจเป็นการดูดติดผิวทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวลดลง อาจเนื่องมาจากมวลชีวภาพ และสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะการดูดติดผิวแบบทางกายภาพ ซึ่งแรงที่ใช้ในการดูดติดผิวทางกายภาพเป็นเพียงแรงแบบ

อ่อนๆ ดังนั้นเมื่อเติมสาร EDTA ที่มากเกินไปในระบบจึงอาจทำให้โครเมียม และตะกั่ว รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกดูดติดอยู่กับมวลชีวภาพแบบกายภาพนั้น เกิดการหลุดออกมาจากมวลชีวภาพได้ จากการทดลองนี้อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า เมื่อเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 150, 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจจะมีผลต่อแรงดึงดูดที่เกิดขึ้น โดยคาดว่าสาร EDTA ที่เพิ่มเข้าไปในระบบนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวของมวลชีวภาพ ซึ่งถ้าเติมสาร EDTA เข้าไปในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมก็สามารถช่วยให้มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดติดโครเมียม และตะกั่วได้มากขึ้น แต่ถ้าเติมสาร EDTA ในระดับที่มากเกินไปก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพลดลงได้เช่นกัน

2) ผลของเวลาสัมผัส

การศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของโครเมียม และตะกั่ว ด้วยมวลชีวภาพจากสับปะรด โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรอย่างละ 100 มิลลิลิตร ต่อมวลชีวภาพ 2.0 กรัม ปรับให้สารละลายมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 2 และนำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที และ ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนถึงช่วงเวลาจุดสมดุล ซึ่งได้ผลการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.6-4.7 จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่า เวลาสัมผัสของน้ำเสียกับมวลชีวภาพที่ไม่เติม EDTA นั้น เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 360-720 นาที (6-12 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมประมาณร้อยละ 39 และร้อยละ 77 ตามลำดับ และจุดสมดุลของการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมอยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 360 นาที (6 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียม ก่อนข้างจะคงที่ และในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 540-900 นาที (6-15 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมประมาณร้อยละ 65 และร้อยละ 88 ตามลำดับ และจุดสมดุลของประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียม อยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 540 นาที (9 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมก่อนข้างจะคงที่เช่นกัน สำหรับในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 720-1080 นาที (12-18 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัด

โครเมียมประมาณร้อยละ 91 และร้อยละ 97 ตามลำดับ และจุดสมมูลของการดูดติดผิว และกำจัดโครเมียม อยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 720 นาที (12 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมค่อนข้างจะคงที่ ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 300 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 360-720 นาที (6-12 ชั่วโมง) มวลชีวภาพ มีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมประมาณร้อยละ 40 และร้อยละ 77 ตามลำดับ และจุดสมมูลอยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 720 นาที (12 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมค่อนข้างจะคงที่ และในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 600 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 360-720 นาที (6-12 ชั่วโมง) มวลชีวภาพ มีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมประมาณร้อยละ 33 และร้อยละ 74 และจุดสมมูลของประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมอยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 720 นาที (12 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดโครเมียมค่อนข้างจะคงที่



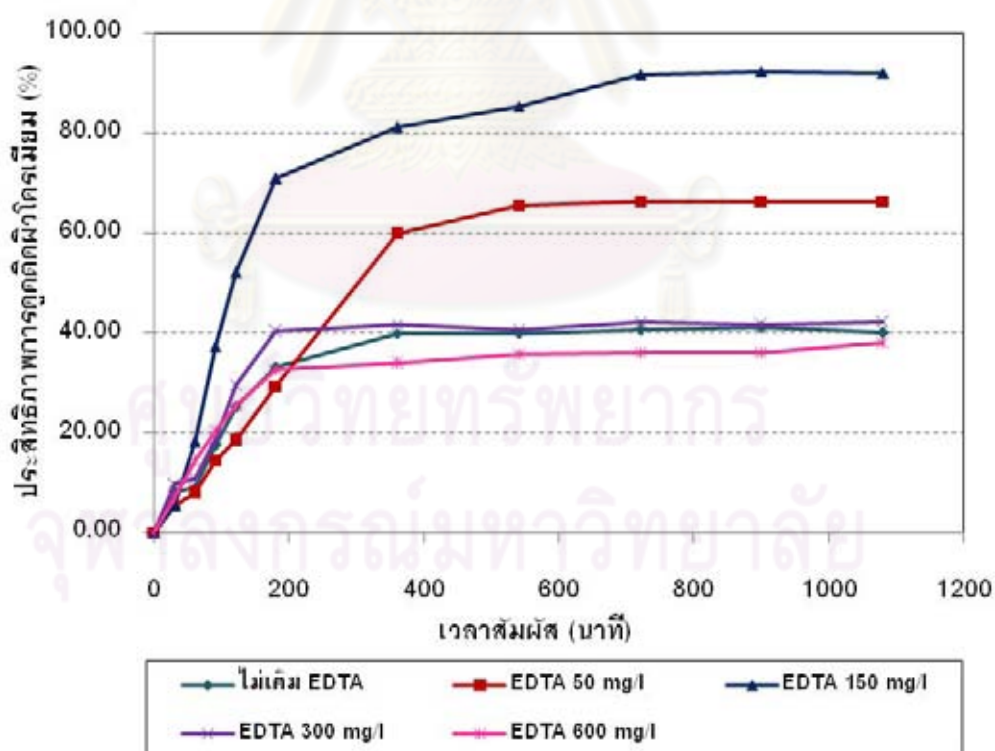
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

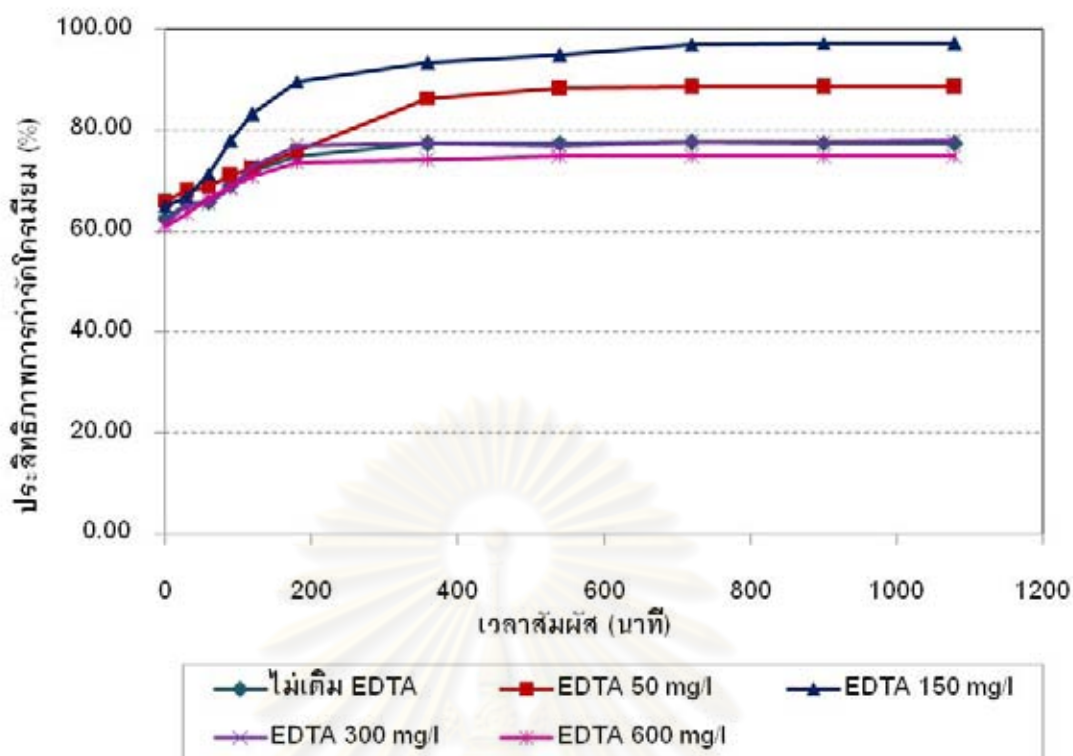
EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาท)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0	0	18.33	19.72	18.20	18.75	0.00	62.50
	30	16.78	17.73	17.16	17.22	8.14	65.55
	60	16.89	16.72	17.61	17.07	8.94	65.85
	90	16.83	14.62	15.01	15.49	17.40	69.03
	120	14.33	14.29	13.54	14.05	25.05	71.89
	180	12.13	12.37	13.07	12.52	33.21	74.95
	360	11.08	10.52	12.21	11.27	39.89	77.46
	540	11.89	11.09	10.82	11.27	39.91	77.47
	720	10.71	10.86	11.88	11.15	40.53	77.70
50	0	17.76	16.54	16.51	16.94	0.00	66.13
	30	15.84	15.88	16.37	16.03	5.37	67.94
	60	15.33	15.37	16.12	15.61	7.87	68.79
	90	13.98	14.73	14.77	14.49	14.44	71.01
	120	12.5	15.11	13.87	13.83	18.38	72.35
	180	11.83	12.31	11.76	11.97	29.36	76.07
	360	6.88	7.47	6.09	6.81	59.78	86.37
	540	4.84	6.73	5.97	5.85	65.49	88.31
	720	5.98	5.49	5.64	5.70	66.33	88.59
	900	5.34	5.74	6.03	5.70	66.33	88.59

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาทื)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
150	0	17.74	16.98	17.76	17.49	0.00	65.01
	30	16.84	15.30	17.49	16.54	5.41	66.91
	60	14.73	14.39	13.85	14.32	18.11	71.35
	90	10.84	10.30	11.74	10.96	37.34	78.08
	120	8.70	7.99	8.48	8.39	52.03	83.22
	180	5.20	5.83	4.30	5.11	70.78	89.78
	360	3.21	2.67	4.02	3.30	81.13	93.40
	540	2.01	3.36	2.28	2.55	85.42	94.90
	720	1.43	1.44	1.44	1.44	91.79	97.13
	900	1.21	1.48	1.37	1.35	92.26	97.29
1080	1.35	1.42	1.40	1.39	92.05	97.22	
300	0	19.83	18.68	19.39	19.30	0.00	61.40
	30	17.94	17.48	16.82	17.41	9.78	65.17
	60	16.88	17.04	17.75	17.22	10.76	65.55
	90	15.87	15.78	15.33	15.66	18.86	68.68
	120	13.47	13.46	13.89	13.61	29.50	72.79
	180	11.59	11.53	11.48	11.53	40.24	76.93
	360	11.48	10.56	11.79	11.28	41.57	77.45
	540	11.84	11.68	10.89	11.47	40.57	77.06
	720	10.68	10.98	11.87	11.18	42.09	77.65

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
600	0	18.98	19.87	19.74	19.53	0.00	60.94
	30	17.57	18.57	18.45	18.20	6.83	63.61
	60	16.59	16.72	16.88	16.73	14.34	66.54
	90	15.52	15.57	15.59	15.56	20.33	68.88
	120	14.74	14.48	14.49	14.57	25.40	70.86
	180	13.02	13.13	13.30	13.15	32.67	73.70
	360	12.90	12.87	13.03	12.93	33.78	74.13
	540	12.98	11.66	12.97	12.54	35.81	74.93
	720	11.96	12.89	12.67	12.51	35.96	74.99



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.8-4.9 จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่า เวลาสัมผัสของน้ำเสียกับมวลชีวภาพที่ไม่เติม EDTA นั้น เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 360-720 นาที (6-12 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วประมาณร้อยละ 34 และร้อยละ 77 ตามลำดับ และจุดสมมูลของการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วอยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 360 นาที (6 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วค่อนข้างจะคงที่ และในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 540-900 นาที (6-15 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วประมาณร้อยละ 72 และร้อยละ 88 ตามลำดับ และจุดสมมูลของประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่ว อยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 540 นาที (9 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วค่อนข้างจะคงที่ สำหรับในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 900-1260 นาที (15-21 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วประมาณร้อยละ 91 และร้อยละ 97 ตามลำดับ และจุดสมมูลของการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่ว อยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 720 นาที (12 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วค่อนข้างจะคงที่ ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี

ความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 300 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 360-720 นาที (6-12 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วประมาณร้อยละ 35 และร้อยละ 77 ตามลำดับ และจุดสมมูลอยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 720 นาที (12 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วค่อนข้างจะคงที่ และในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 600 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 360-720 นาที (6-12 ชั่วโมง) มวลชีวภาพมีค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วประมาณร้อยละ 43 และร้อยละ 74 และจุดสมมูลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วอยู่ที่เวลาสัมผัสเท่ากับ 720 นาที (12 ชั่วโมง) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการกำจัดตะกั่วค่อนข้างจะคงที่เช่นกัน



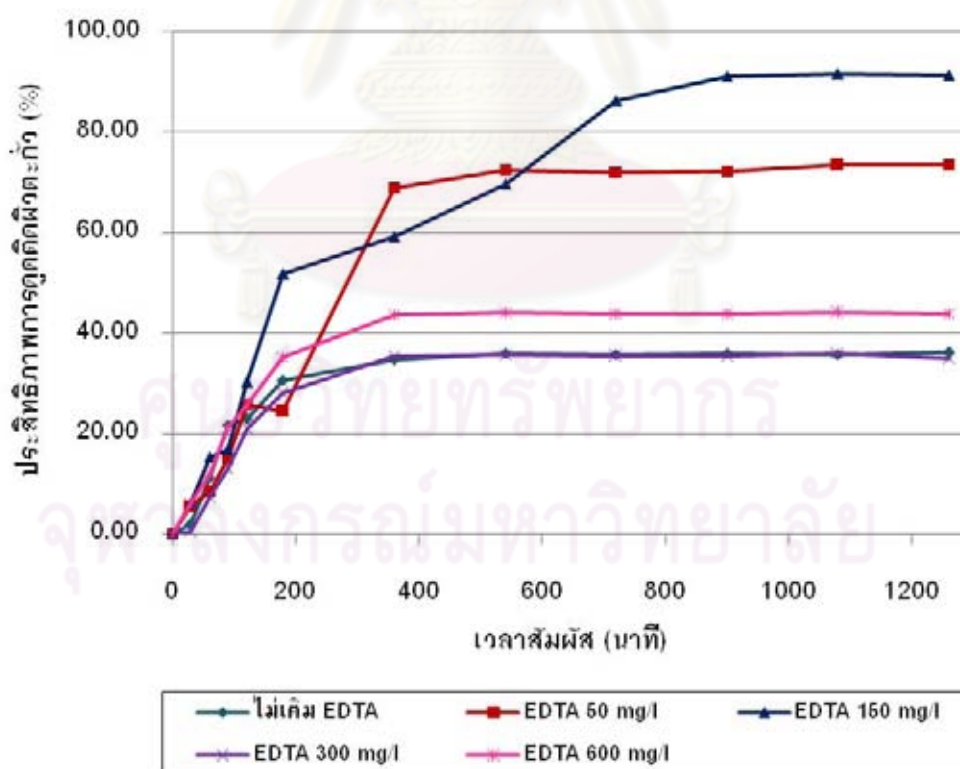
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

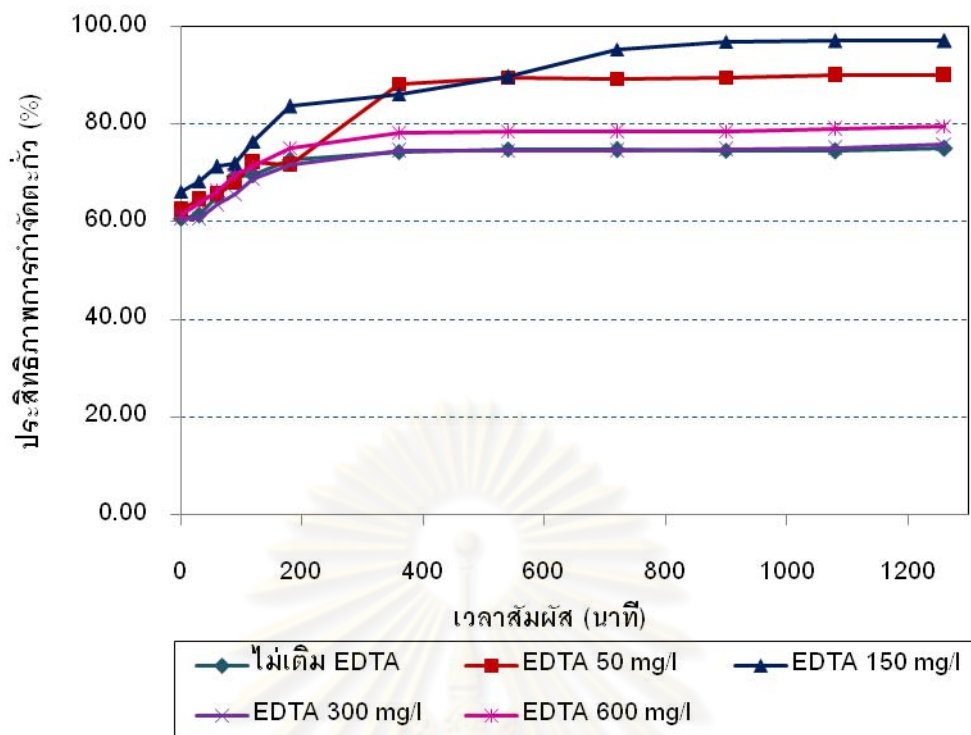
EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาท)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0	0	19.34	20.14	19.42	19.63	0.00	60.73
	30	18.94	18.87	19.98	19.26	1.87	61.47
	60	17.75	17.74	16.82	17.44	11.17	65.13
	90	14.33	15.49	16.31	15.38	21.67	69.25
	120	13.43	15.16	16.85	15.15	22.84	69.71
	180	13.09	14.47	13.32	13.63	30.58	72.75
	360	13.18	12.53	12.687	12.80	34.80	74.40
	540	12.93	12.87	11.85	12.55	36.07	74.90
	720	12.97	11.89	12.94	12.60	35.81	74.80
50	0	18.47	18.48	19.37	18.77	0.00	62.45
	30	17.64	17.67	17.83	17.71	5.63	64.57
	60	16.49	17.64	17.47	17.20	8.36	65.60
	90	15.90	16.04	15.87	15.94	15.10	68.13
	120	13.39	14.95	13.44	13.93	25.80	72.15
	180	14.03	14.74	13.82	14.20	24.37	71.61
	360	5.84	5.79	5.88	5.84	68.90	88.33
	540	4.90	4.79	5.74	5.14	72.60	89.71
	720	6.75	4.03	5.01	5.26	71.96	89.47
	900	5.43	4.38	5.80	5.20	72.28	89.59
	1080	4.73	4.87	5.37	4.99	73.42	90.02

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
150	0	16.54	16.72	17.35	16.87	0.00	66.26
	30	15.48	16.04	15.99	15.84	6.13	68.33
	60	14.78	14.3	13.76	14.28	15.35	71.44
	90	13.87	14.37	13.89	14.04	16.76	71.91
	120	12.79	11.47	11.03	11.76	30.27	76.47
	180	8.38	7.47	8.50	8.12	51.89	83.77
	360	7.25	6.73	6.63	6.87	59.28	86.26
	540	6.02	5.77	3.52	5.10	69.75	89.79
	720	2.05	2.13	2.76	2.31	86.29	95.37
	900	1.17	1.47	1.85	1.50	91.13	97.01
	1080	1.14	1.08	1.98	1.40	91.70	97.20
1260	1.36	1.82	1.17	1.45	91.40	97.10	
300	0	20.08	18.26	20.72	19.69	0.00	60.63
	30	19.84	19.47	19.56	19.62	0.34	60.75
	60	18.58	17.58	18.64	18.27	7.23	63.47
	90	16.84	17.23	17.31	17.13	13.02	65.75
	120	15.82	15.47	15.48	15.59	20.82	68.82
	180	14.37	14.39	13.79	14.18	27.97	71.63
	360	12.87	12.67	12.59	12.71	35.45	74.58
	540	12.57	12.34	13.05	12.65	35.74	74.69
	720	12.48	12.88	12.81	12.72	35.38	74.55

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาทื)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
600	0	19.04	19.76	18.79	19.20	0.00	61.61
	30	17.85	18.44	17.83	18.04	6.04	63.92
	60	16.49	16.87	17.34	16.90	11.98	66.20
	90	14.78	15.18	15.48	15.15	21.11	69.71
	120	13.85	14.36	14.56	14.26	25.75	71.49
	180	12.42	12.38	12.47	12.42	35.30	75.15
	360	11.04	11.09	10.37	10.83	43.58	78.33
	540	10.34	10.77	11.03	10.71	44.20	78.57
	720	10.76	10.73	10.83	10.77	43.89	78.45



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

3) การทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับของมวลชีวภาพ

การทดสอบไอโซเทอมของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด เพื่อการกำจัดโครเมียม และตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และตะกั่วเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำมาทำการทดสอบไอโซเทอม 2 รูปแบบ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (freundlich adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ มีแนวคิดตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับเสมือนปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวที่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจึงเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว และโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้แล้ว ไม่มีผลกระทบต่อ การดูดซับโมเลกุลอื่น

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช เป็นแบบจำลองสมดุลการดูดซับที่ใช้ อธิบายการดูดซับที่สารถูกดูดซับมีพื้นผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดของการดูดซับขึ้นอยู่กับพลังงานในการดูดซับ ซึ่งมีพลังงานที่ใช้ไม่เท่ากันเสมอไป พลังงานในการดูดซับเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของพื้นผิวที่ครอบคลุมถึงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งเหมาะสมกับการดูดซับ แบบหลายชั้น

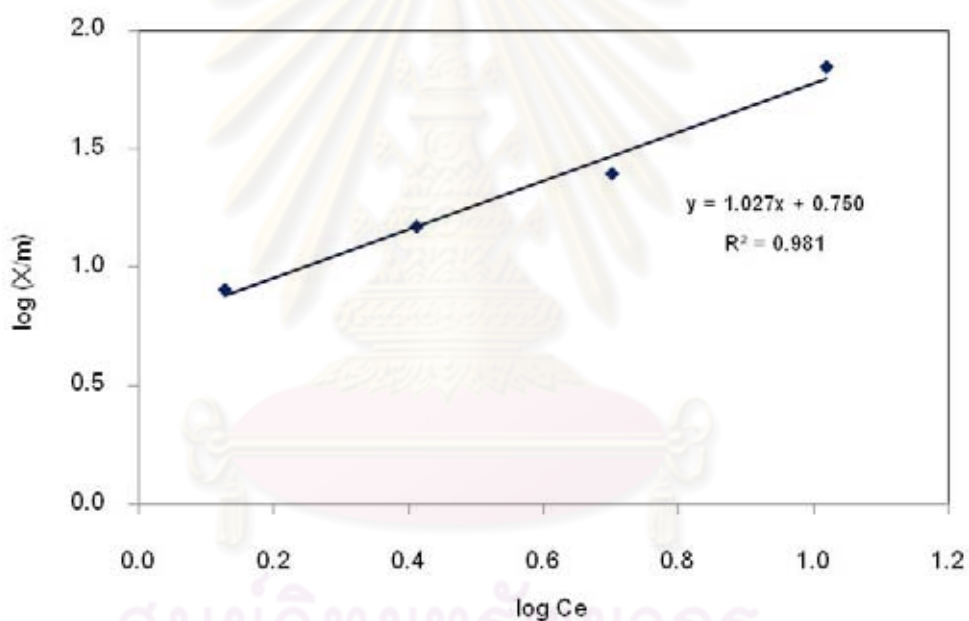
ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนดลิช ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับโครเมียม และตะกั่วบนมวลชีวภาพที่ผลิตจากต้น และใบของสับปะรด เมื่อนำค่าสมดุลการดูดติดผิวมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.10-4.13 ตามลำดับ

ค่าคงที่การดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชคำนวณได้จาก ความชัน และระยะตัดแกนของสมการที่ (4.1)-(4.2) ซึ่งจะมีค่าคงที่ ที่จุดตัดแกน Y เท่ากับ $\log K$ และความชันเท่ากับ $1/n$ ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดติดผิวได้ โดยถ้าค่า $\log K$ และ $1/n$ มีค่ามาก ก็จะทำให้เห็นถึงความสามารถในการดูดติดผิวสูง แต่ถ้าค่า $\log K$ และ $1/n$ มีค่าน้อย ก็จะทำให้เห็นถึงความสามารถในการดูดติดผิวต่ำ ในขณะที่ค่าคงที่ การดูดติดผิวของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์คำนวณได้จากความชัน และระยะตัดแกนของสมการที่ (4.3)-(4.4) โดยอิทธิพลของรูปแบบไอโซเทอม บอถึงการดูดซับที่เหมาะสม และไม่เหมาะสม สามารถพิจารณาได้ (weber and chakravorti, 1974) โดยพิจารณาจากค่า R-Square (R^2) ซึ่งไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วของมวลชีวภาพจากสับปะรด พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้ แน่ชัดว่า การดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วบนมวลชีวภาพที่ผลิตจากต้น และใบของสับปะรดนั้น เป็นไอโซเทอมแบบแลงมัวร์หรือไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

ผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.11-4.13 และรูปที่ 4.10-4.11 และผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.14-4.16 และรูปที่ 4.12-4.13

ตารางที่ 4.11 การทดสอบไอโซเทอมแบบพหุนคติของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

มวลชีวภาพ (g)	Ce (mg/l)	X (mg)	X/m (mg/g)	logCe	log(X/m)
0	17.49	-	-	-	-
0.10	10.47	8.28	82.80	1.02	1.85
0.50	5.03	13.72	27.44	0.70	1.40
1.00	2.58	16.17	16.17	0.41	1.17
2.00	1.34	17.41	8.71	0.13	0.91



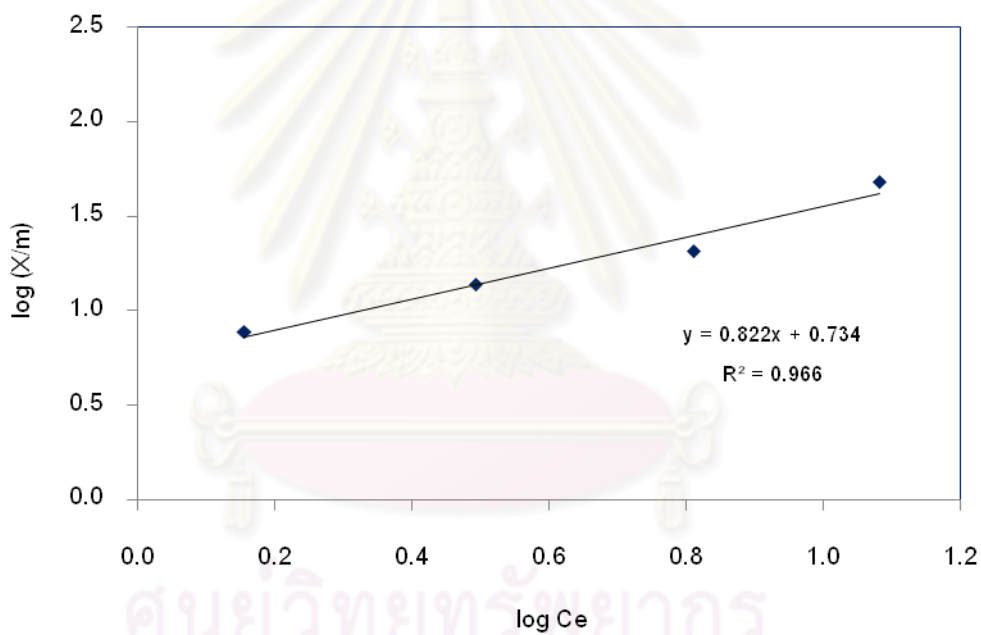
รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมแบบพหุนคติของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียม ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบพหุนคติ คือ

$$\text{Log}(x/m) = 0.750 + 1.027 \log C_e \quad \dots(4.1)$$

ตารางที่ 4.12 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

มวลชีวภาพ (g)	Ce (mg/l)	X (mg)	X/m (mg/g)	logCe	log(X/m)
0.00	16.87	-	-	-	-
0.10	12.05	4.82	48.20	1.08	1.68
0.50	6.47	10.40	20.80	0.81	1.32
1.00	3.11	13.76	13.76	0.49	1.14
2.00	1.43	15.44	7.72	0.16	0.89



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิช คือ

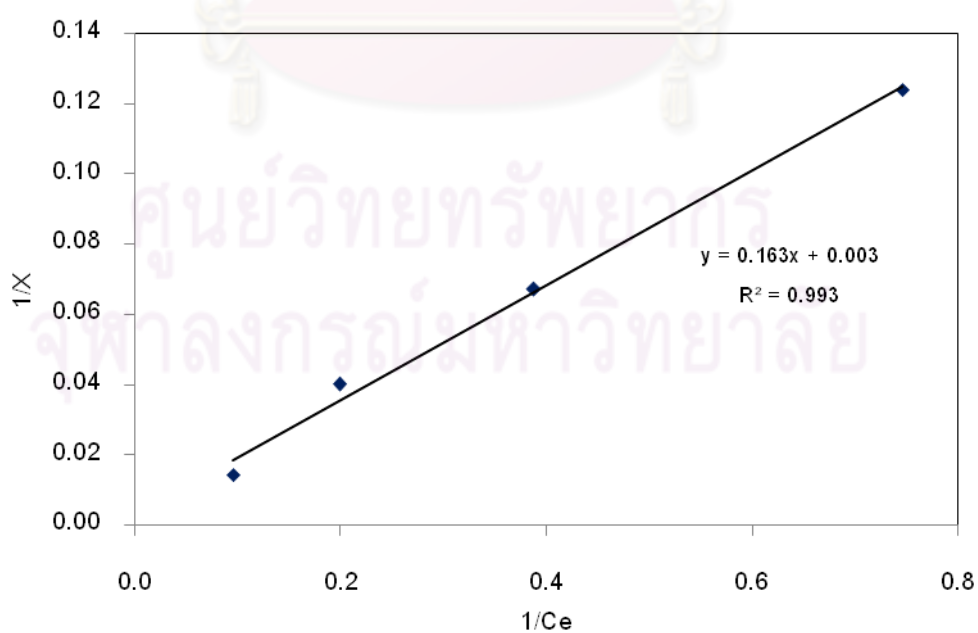
$$\text{Log}(x/m) = 0.734 + 0.822 \log C_e \quad \dots(4.2)$$

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของมวลชีวภาพ

โลหะหนัก	สมการ	R^2	logK	1/n
โครเมียม	$y = 1.027x + 0.750$	$R^2 = 0.981$	0.750	1.027
ตะกั่ว	$y = 0.822x + 0.734$	$R^2 = 0.966$	0.734	0.822

ตารางที่ 4.14 การทดสอบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียมที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

มวลชีวภาพ (g)	Ce (mg/l)	X (mg)	X/m (mg/g)	1/Ce	1/X
0	17.49	-	-	-	-
0.10	10.47	8.28	82.80	0.10	0.01
0.50	5.03	13.72	27.44	0.20	0.04
1.00	2.58	16.17	16.17	0.39	0.07
2.00	1.34	17.41	8.71	0.75	0.12



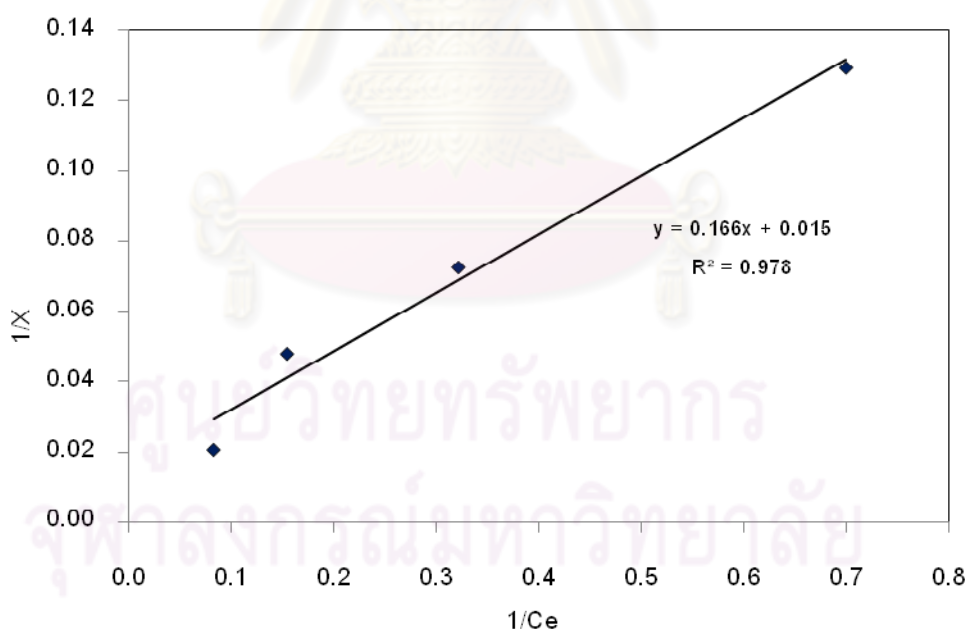
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพในการดูดซับโครเมียมที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คือ

$$1/X = 0.003 + 0.163 (1/C_e) \quad \dots(4.3)$$

ตารางที่ 4.15 การทดสอบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

มวลชีวภาพ (g)	Ce (mg/l)	X (mg)	X/m (mg/g)	1/Ce	1/X
0.00	16.87	-	-	-	-
0.10	12.05	4.82	48.20	0.08	0.02
0.50	6.47	10.40	20.80	0.15	0.05
1.00	3.11	13.76	13.76	0.32	0.07
2.00	1.43	15.44	7.72	0.70	0.13



รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพในการดูดซับตะกั่ว
ที่เติม EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คือ

$$1/X = 0.015 + 0.166 (1/C_0) \quad \dots(4.4)$$

ตารางที่ 4.16 ค่าคงที่ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของมวลชีวภาพ

โลหะหนัก	สมการ	R^2	$1/X_m$	$1/bX_m$	Q_{max} (mg/g)
โครเมียม	$y = 0.163x + 0.003$	$R^2 = 0.993$	0.003	0.163	81.15
ตะกั่ว	$y = 0.166x + 0.015$	$R^2 = 0.978$	0.015	0.166	40.19

4.2 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (column experiment)

การทดลองการดูดซับโครเมียม และตะกั่วด้วยของมวลชีวภาพจากต้น และใบของ สับปะรดแบบคอลัมน์หรือแบบต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ชนิดอะคริลิก (acrylic column) ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ โครเมียม และตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าสู่คอลัมน์แบบไหลขึ้นอย่างต่อเนื่อง (up flow-fed) โดยใช้ Peristaltic pumps โดยแปรผันระยะเวลาที่เก็บ (Empty Bed Contact Time; EBCT) 3 ค่าคือ 50, 100 และ 150 นาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการไหลเท่ากับ 1.8, 1.0 และ 0.6 มิลลิลิตรต่อ นาที ตามลำดับ ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

คอลัมน์	EBCT (นาที)	ความเข้มข้นของ โลหะหนัก (mg/l)	ความเข้มข้น ของ EDTA (mg/l)	อัตราการไหล (ml/min)
A	50	50	150	1.8
B	100	50	150	1.0
C	150	50	150	0.6

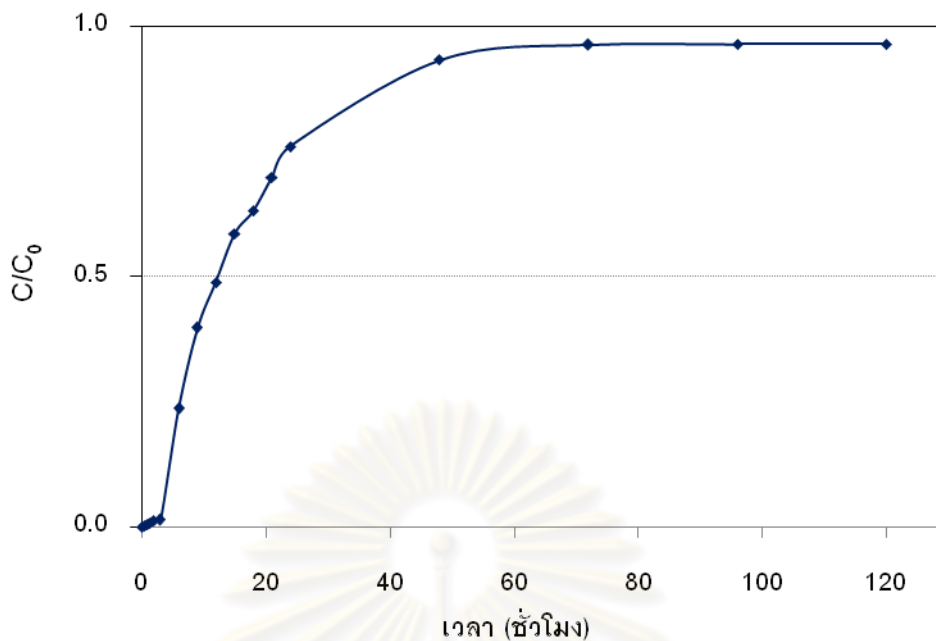
การเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บที่ทางน้ำออก และนำไปทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่ว ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักคงเหลือ กำหนดจุดเบรคทวร์จ (breakthrough) ที่ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และตะกั่วเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ และตะกั่วที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องมีปริมาณไม่มากกว่า 0.25 และ 0.20 ตามลำดับ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2, 2539)

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14 – 4.33

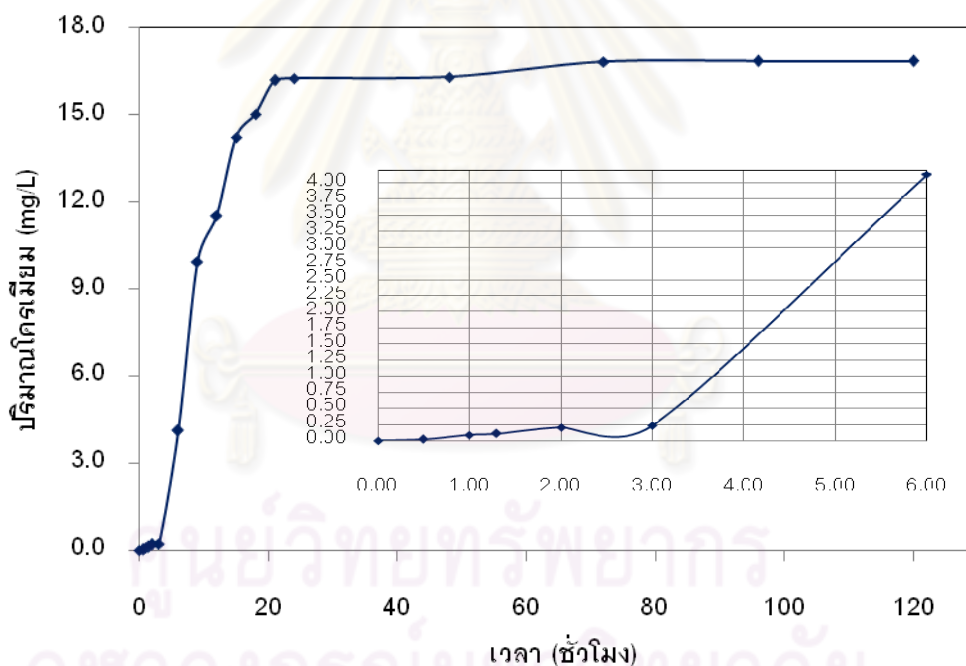
4.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วของมวลชีวภาพ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์

4.2.1.1 ผลการทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาที่เก็บ 50 นาที

ผลจากการใช้สารดูดซับจากมวลชีวภาพจากสับปะรดในการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่เก็บ 50 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์เท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร ต่อ นาที ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทวร์จในคอลัมน์นี้ได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 จากการวัดค่าการดูดติดผิวพบว่า ในช่วง 3 ชั่วโมง ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที และ 1 ชั่วโมง คือที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที ปริมาณโครเมียมที่ออกมาจากคอลัมน์มีค่าน้อย คือเท่ากับ 0.02, 0.09, 0.11, 0.20 และ 0.23 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และที่ช่วงเวลา 6-24 ชั่วโมง ปริมาณของโครเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 13.27 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตจากความชันในช่วงดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปถึงจุดเบรคทวร์จที่กำหนดให้มีปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียเท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียเริ่มคงที่ ที่เวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 16.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด



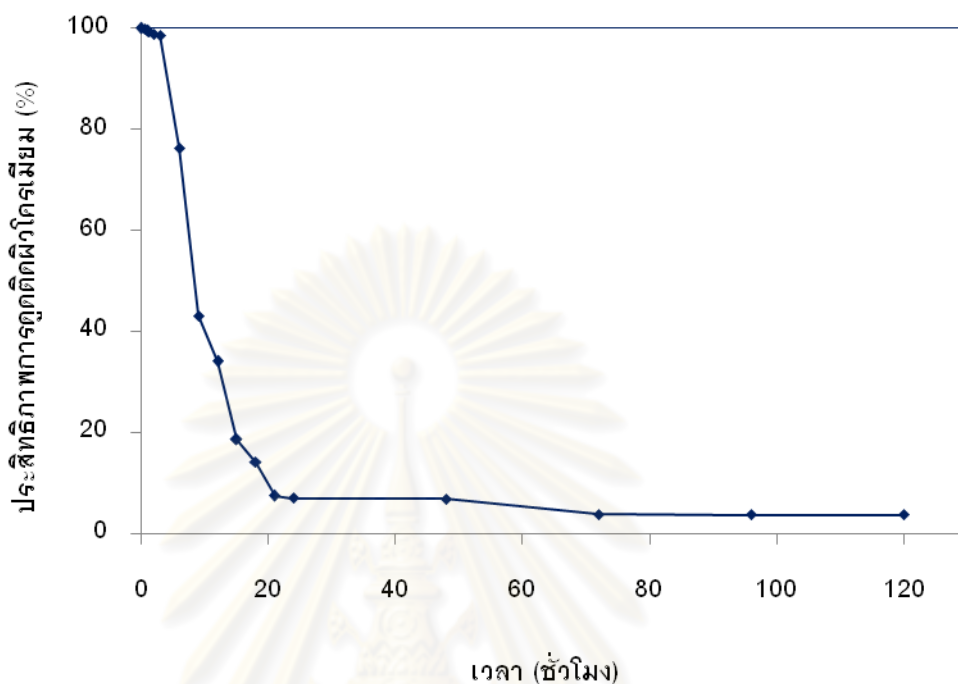
รูปที่ 4.14 เส้นโค้งเบรคทรูจี้ในคอลัมน์ดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50 นาที (C/C_0)



รูปที่ 4.15 การดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่กักเก็บ 50 นาที หรืออัตราการไหล 1.8 มล./นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด รูปที่ 4.16 พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ ที่เวลา 6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 76.39 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเท่ากับร้อยละ 24.13 และประสิทธิภาพลดลงทีละน้อยจนถึงที่เวลา 120

ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวคงที่ที่ร้อยละ 3.66 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 96.10

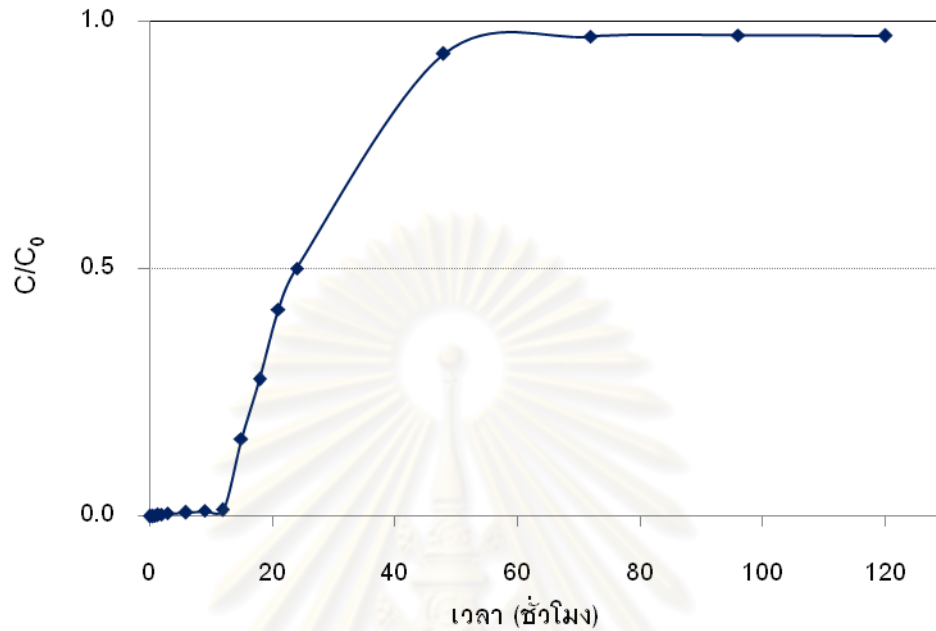


รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่เก็บ 50 นาที

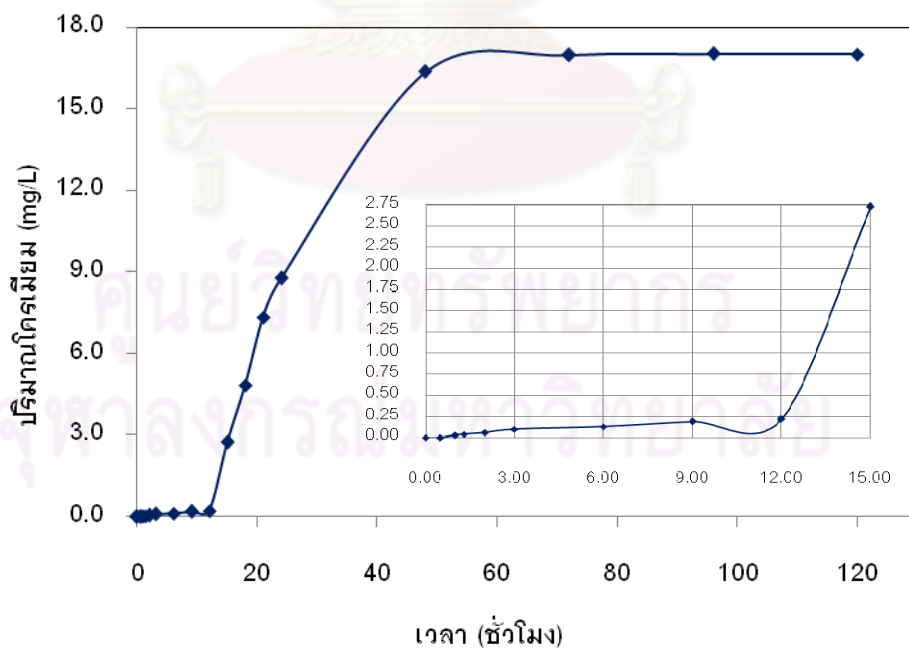
4.2.1.2 ผลการทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาที่เก็บ 100 นาที

ผลจากการใช้สารดูดซับจากมวลชีวภาพจากสับปะรดในการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่เก็บ 100 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทอร์จในคอลัมน์นี้ได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 จากการวัดค่าการดูดติดผิวพบว่า ในช่วง 12 ชั่วโมง ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง คือที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 30, 60, 90, 120, 180 นาที 6, 9 และ 12 ชั่วโมง ปริมาณโครเมียมที่ออกมาจากคอลัมน์มีค่าน้อย คือเท่ากับ 0.00, 0.03, 0.04, 0.06, 0.10, 0.13, 0.19 และ 0.22 มิลลิกรัม/ลิตร และที่ช่วงเวลา 15-24 ชั่วโมง ปริมาณของโครเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 8.78 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตจากความชันในช่วงดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปถึงจุดเบรคทอร์จที่กำหนดให้มีปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียเท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียเริ่มคงที่ ที่เวลา 72 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 17.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่า

ใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด

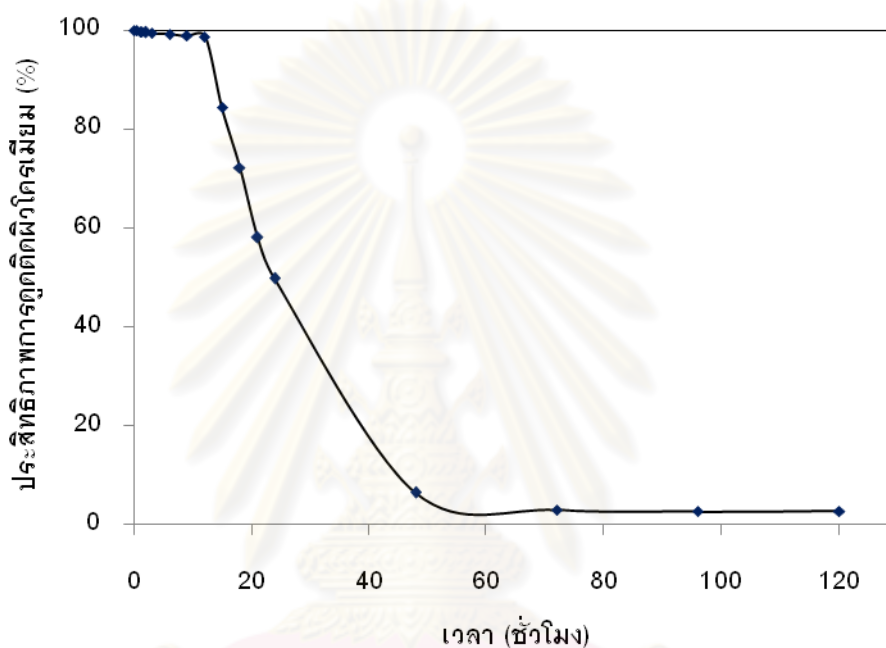


รูปที่ 4.17 เส้นโค้งเบรคทลูจในคอลัมน์ดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 100 นาที (C/C_0)



รูปที่ 4.18 การดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 100 นาที หรืออัตราการใช้ 1.0 มล./นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด รูปที่ 4.19 พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมจะลดลงเมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ ที่เวลา 15 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 84.39 ที่เวลา 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเท่ากับร้อยละ 12.18 และประสิทธิภาพลดลงที่ละน้อยจนถึงที่เวลา 120 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวคงที่ที่ร้อยละ 2.80 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.00

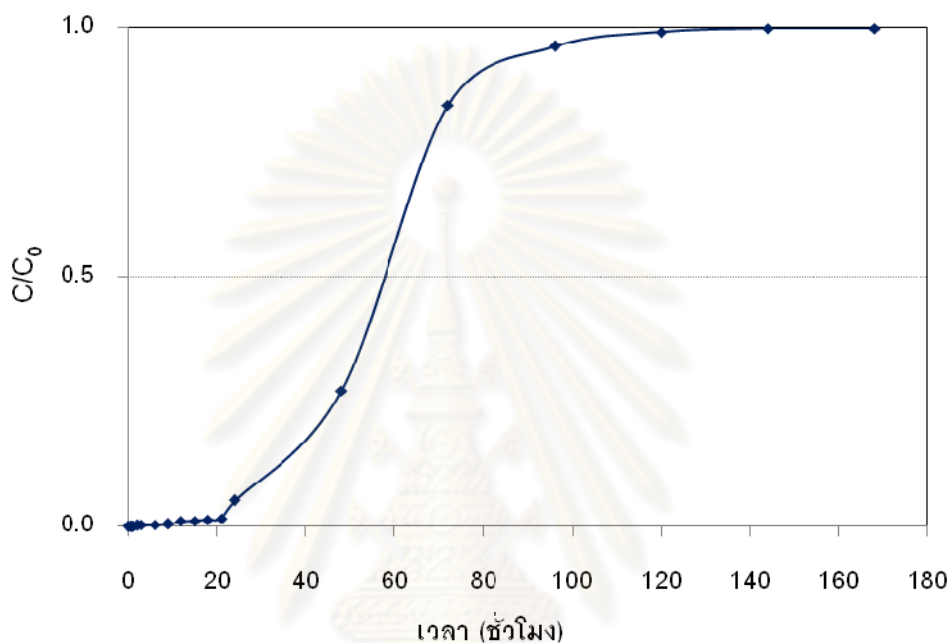


รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่เก็บ 100 นาที

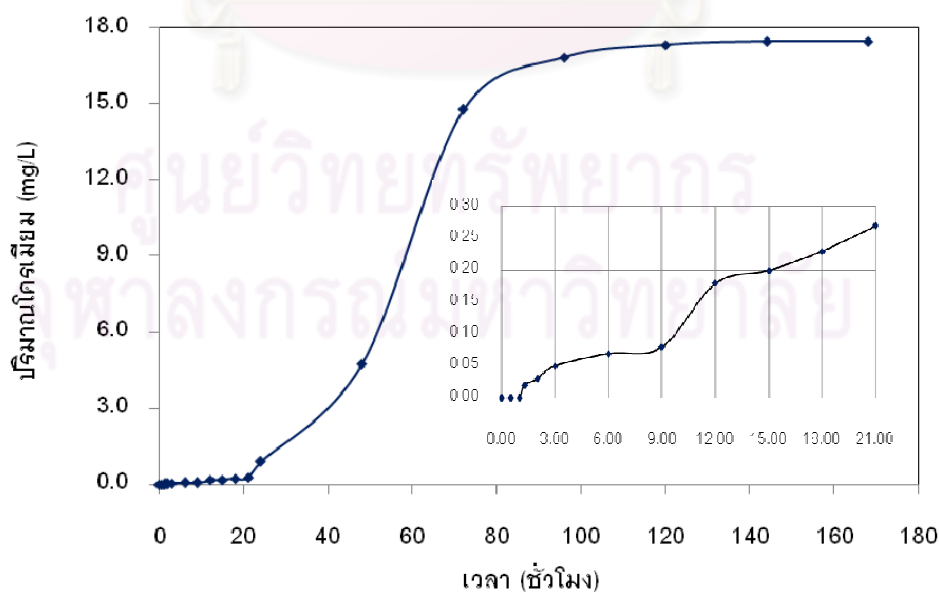
4.2.1.3 ผลการทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาที่เก็บ 150 นาที

ผลจากการใช้สารดูดซับจากมวลชีวภาพจากสับปะรดในการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาที่เก็บ 150 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์เท่ากับ 0.6 มิลลิลิตรต่ออนาที ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทอร์จในคอลัมน์นี้ได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 จากการวัดค่าการดูดติดผิวพบว่า ในช่วง 24 ชั่วโมง ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง คือที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 30, 60, 90, 120, 180 นาที 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง ปริมาณโครเมียมที่ออกมาจากคอลัมน์มีค่าน้อย คือเท่ากับ 0.00, 0.00, 0.02, 0.03, 0.05, 0.07, 0.08, 0.18, 0.20, 0.23, 0.27 และ 0.90 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และที่ช่วงเวลา 48-96 ชั่วโมง ปริมาณของโครเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.90 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 16.83

มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตจากความชันในช่วงดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปถึงจุดเบรคทอร์จที่กำหนดให้มีปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียเท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียเริ่มคงที่ ที่เวลา 120 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 17.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด

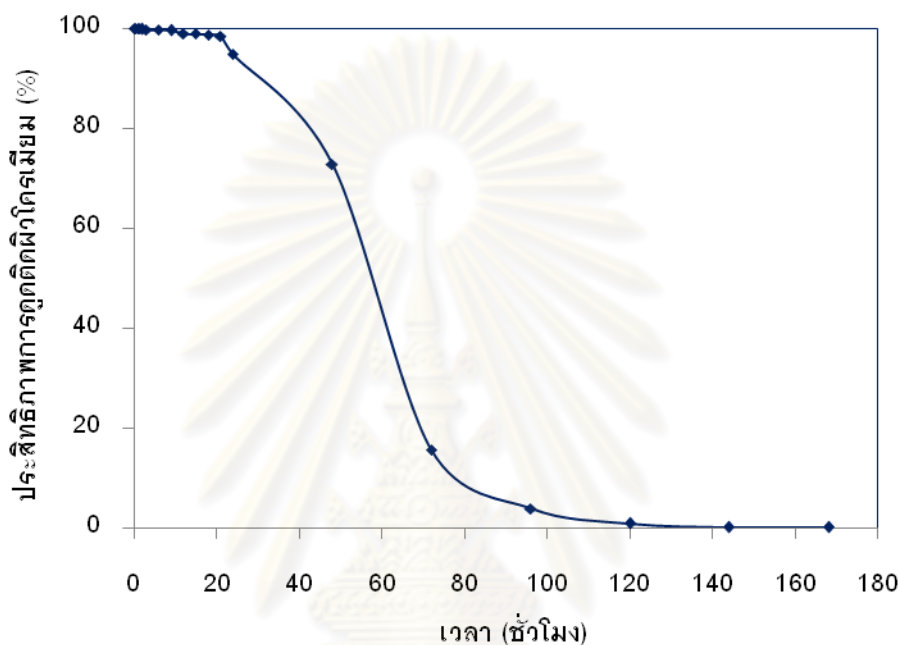


รูปที่ 4.20 เส้นโค้งเบรคทอร์จในคอลัมน์ดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 150 นาที (C/C_0)



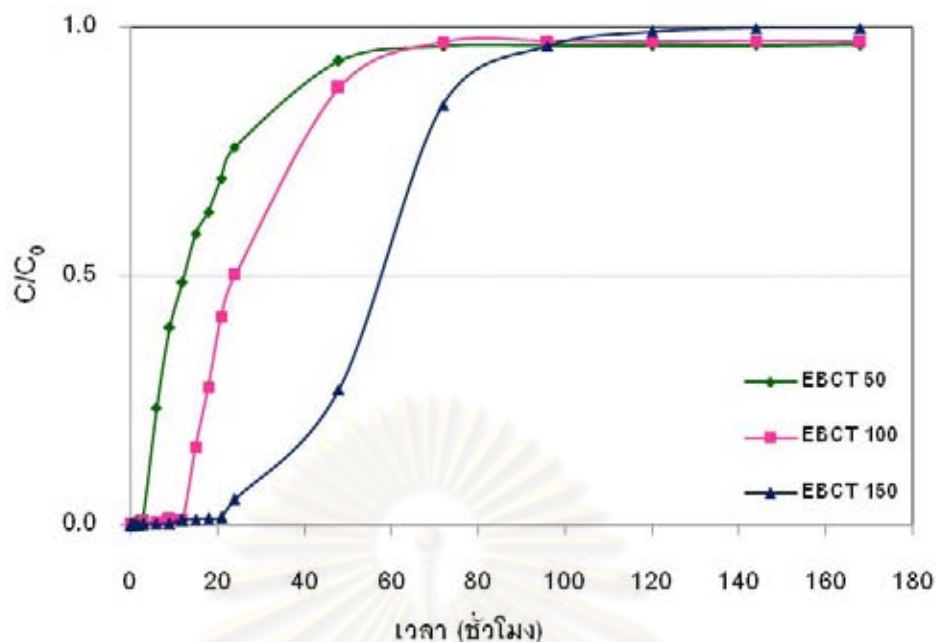
รูปที่ 4.21 การดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาพักเก็บ 150 นาที หรืออัตราการไหลเท่ากับ 0.6 มล./นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด รูปที่ 4.22 พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมจะลดลงเมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ ที่เวลา 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 72.78 ที่เวลา 96 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเท่ากับร้อยละ 3.77 และประสิทธิภาพลดลงที่ละน้อยจนถึงที่เวลา 120 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวคงที่ที่ร้อยละ 0.09 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.46



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมที่ระยะเวลาเก็บ 150 นาที

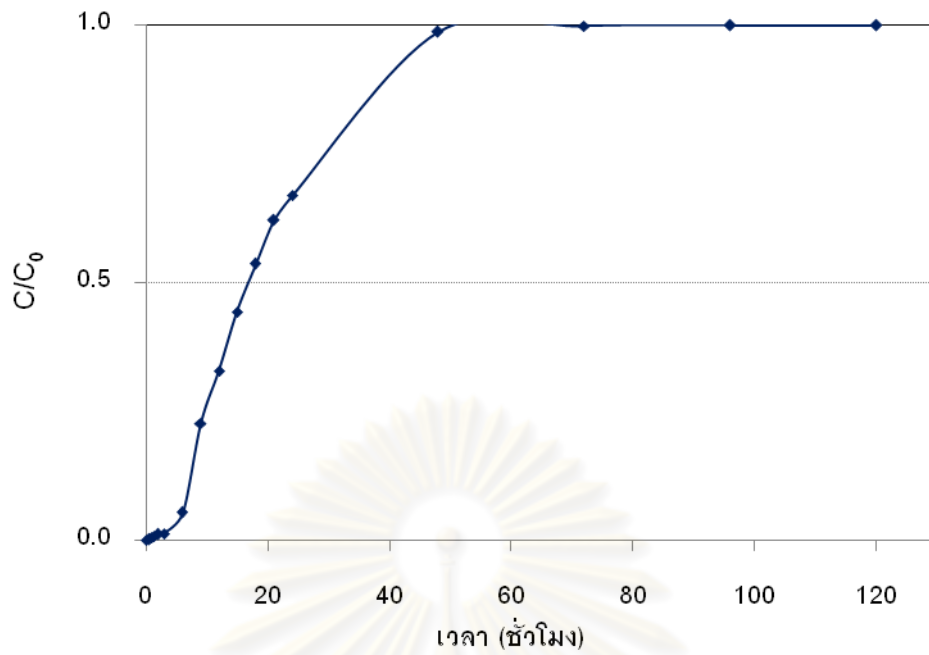
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดติดผิวของโครเมียมในคอลัมน์ดูดติดผิวทั้ง 3 คอลัมน์ได้แก่ คอลัมน์ A, B และ C (ตารางที่ 4.17) รูปที่ 4.23 พบว่า ในคอลัมน์ที่ C ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.46 รองลงมาคือ คอลัมน์ B และ A ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.00 และ 96.10 ตามลำดับ เนื่องจากในคอลัมน์ A มีอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เร็วที่สุดคือ 1.8 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ออกมามากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในคอลัมน์ B ซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ในขณะที่ในคอลัมน์ C มีอัตราการไหลช้าที่สุดคือ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งทำให้เกิดการสะสมตัวของโครเมียมที่ผ่านชั้นของมวลชีวภาพที่ละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของโครเมียมออกมา กับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัด ในกรณีนี้มวลชีวภาพหรือสารดูดซับจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่



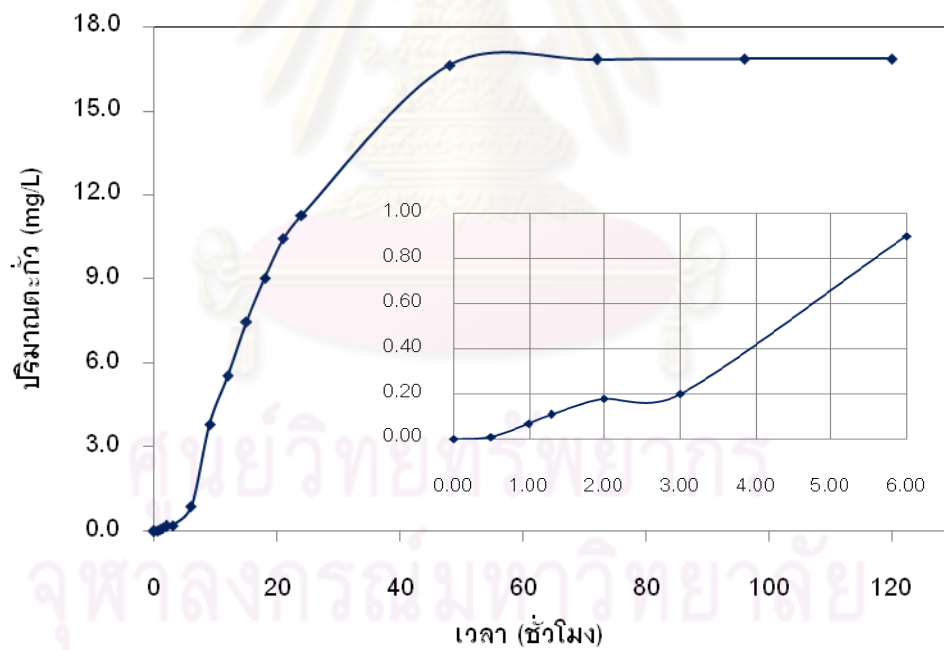
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบเส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ดูดติดผิว
ที่ระยะเวลาพักเก็บ 50, 100 และ 150 นาที

4.2.1.4 ผลการทดสอบการดูดติดผิวตะกั่วแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาที

ผลจากการใช้สารดูดซับจากมวลชีวภาพจากสับปะรดในการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์เท่ากับ 1.8 มิลลิลิตร ต่อ นาที ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทฤษฎีในคอลัมน์ได้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 จากการวัดค่าการดูดติดผิวพบว่า ในช่วง 3 ชั่วโมง ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที 1 ชั่วโมง คือที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 30, 60, 90, 120, 180 นาที ปริมาณตะกั่วที่ออกมาจากคอลัมน์มีค่าน้อย คือเท่ากับ 0.01, 0.07, 0.11, 0.18 และ 0.20 มิลลิกรัม/ลิตร และที่ช่วงเวลา 6-24 ชั่วโมง ปริมาณของตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 11.27 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตจากความชันในช่วงดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปถึงจุดเบรคทฤษฎีที่กำหนดให้มีปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียเริ่มคงที่ ที่เวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 16.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด

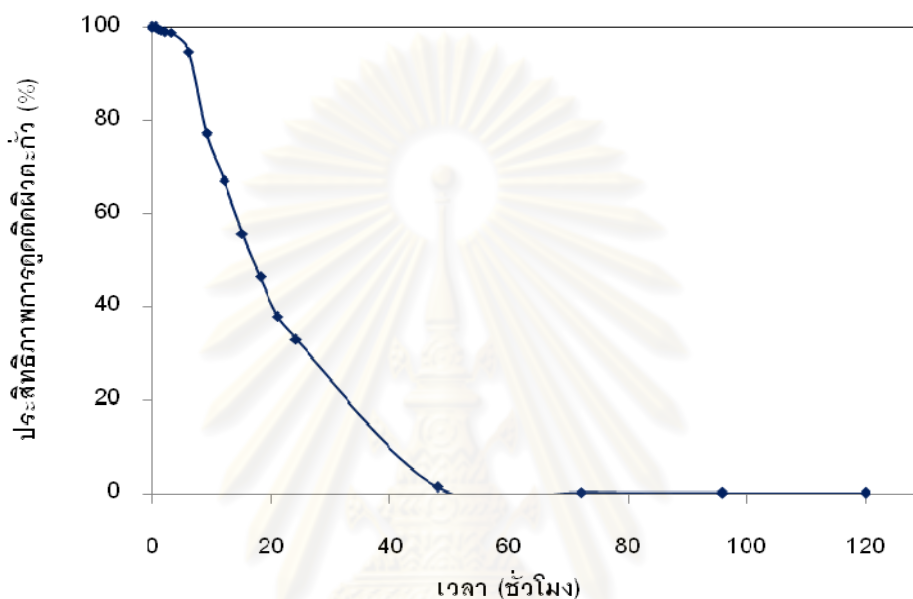


รูปที่ 4.24 เส้นโค้งเบรคทรูจีในคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาที (C/C_0)



รูปที่ 4.25 การดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาพักเก็บ 50 นาที หรืออัตราการไหล 1.8 มล./นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด รูปที่ 4.26 พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วจะลดลงเมื่อปริมาตรน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ ที่เวลา 3 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 98.81 ที่เวลา 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเท่ากับร้อยละ 1.36 และประสิทธิภาพลดลงที่ละน้อยจนถึงที่เวลา 120 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวคงที่ที่ร้อยละ 0.12 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.44

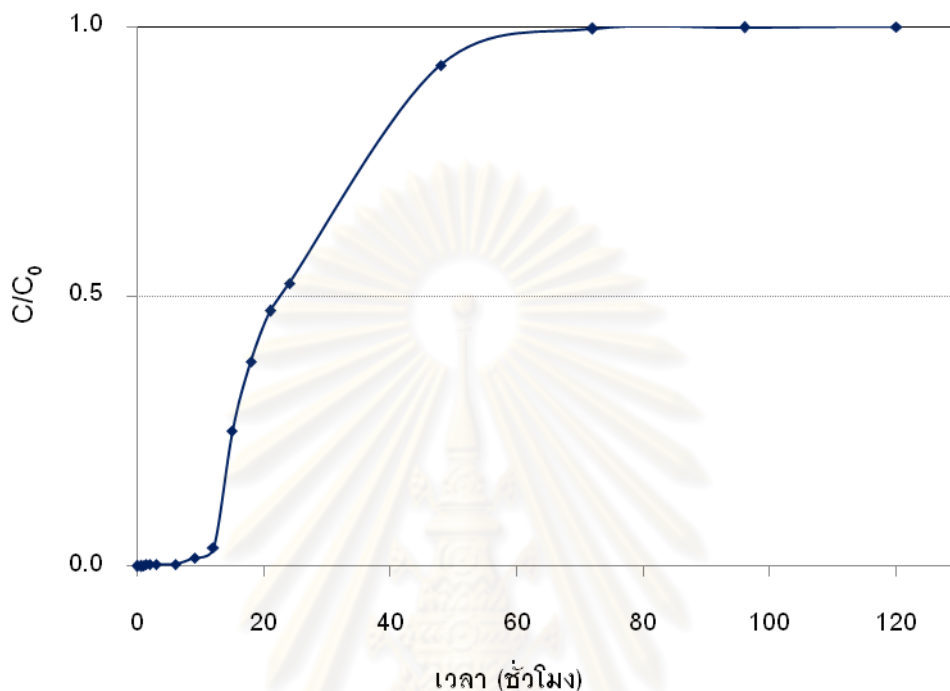


รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลากักเก็บ 50 นาที

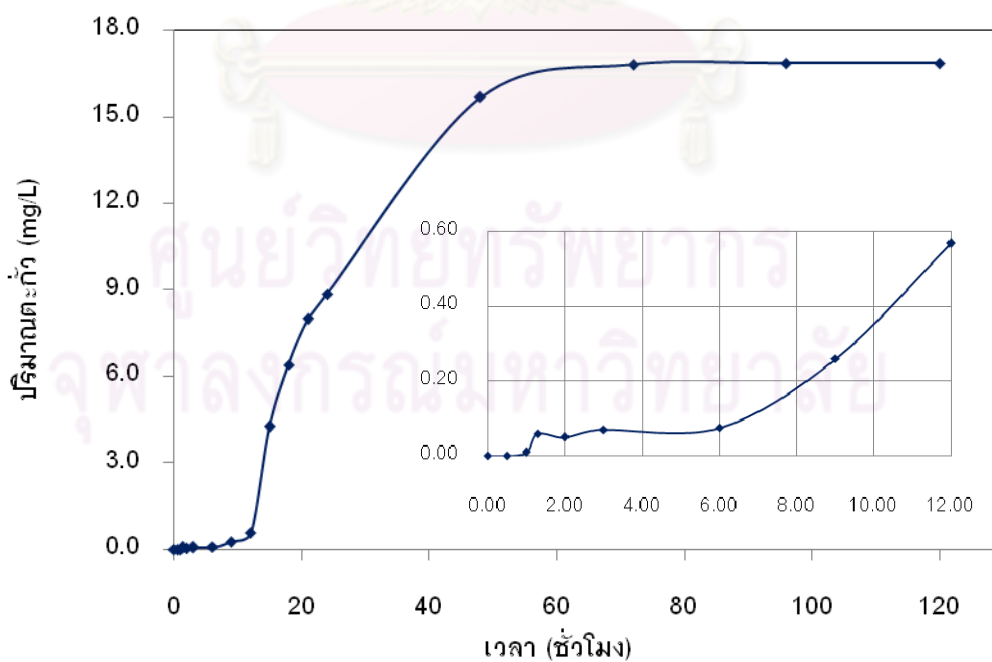
4.2.1.5 ผลการทดสอบการดูดติดผิวตะกั่วแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บ 100 นาที

ผลจากการใช้สารดูดซับจากมวลชีวภาพจากสับปะรดในการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลากักเก็บ 100 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์เท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทอร์จ์ในคอลัมน์ได้ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 จากการวัดค่าการดูดติดผิวพบว่า ในช่วง 12 ชั่วโมง ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง คือที่ระยะเวลากำจัดผ่านไป 30, 60, 90, 120, 180 นาที 6, 9 และ 12 ชั่วโมง ปริมาณตะกั่วที่ออกมาจากคอลัมน์มีค่าน้อย คือเท่ากับ 0.00, 0.01, 0.06, 0.05, 0.07, 0.08, 0.26 และ 0.57 มิลลิกรัม/ลิตร และที่ช่วงเวลา 15-48 ชั่วโมง ปริมาณของตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.57 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 15.67 มิลลิกรัมต่อลิตร สืบเนื่องจากความชันในช่วงดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปถึงจุดเบรคทอร์จ์ที่กำหนดให้มีปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

มากขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียเริ่มคงที่ ที่เวลา 72 ชั่วโมง ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 16.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด

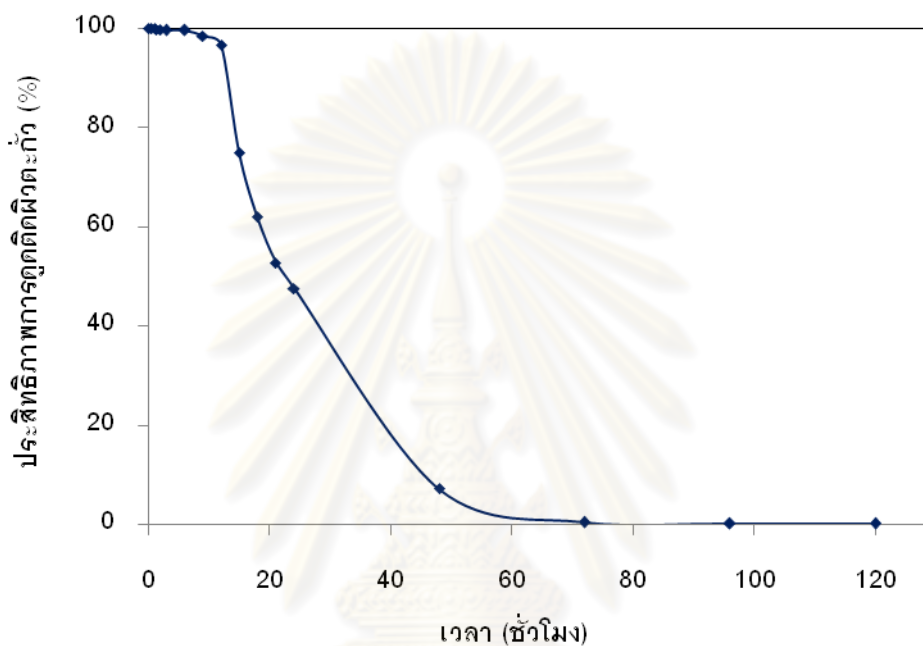


รูปที่ 4.27 เส้นโค้งเบรคทลูจีในคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บ 100 นาที (C/C_0)



รูปที่ 4.28 การคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บ 100 นาที หรืออัตราการใช้ 1.0 มล./นาที

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด รูปที่ 4.29 พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 96.62 ที่เวลา 72 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเท่ากับร้อยละ 0.36 และประสิทธิภาพลดลงที่ละน้อยจนถึงที่เวลา 120 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวคงที่ที่ร้อยละ 0.06 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทอร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.48



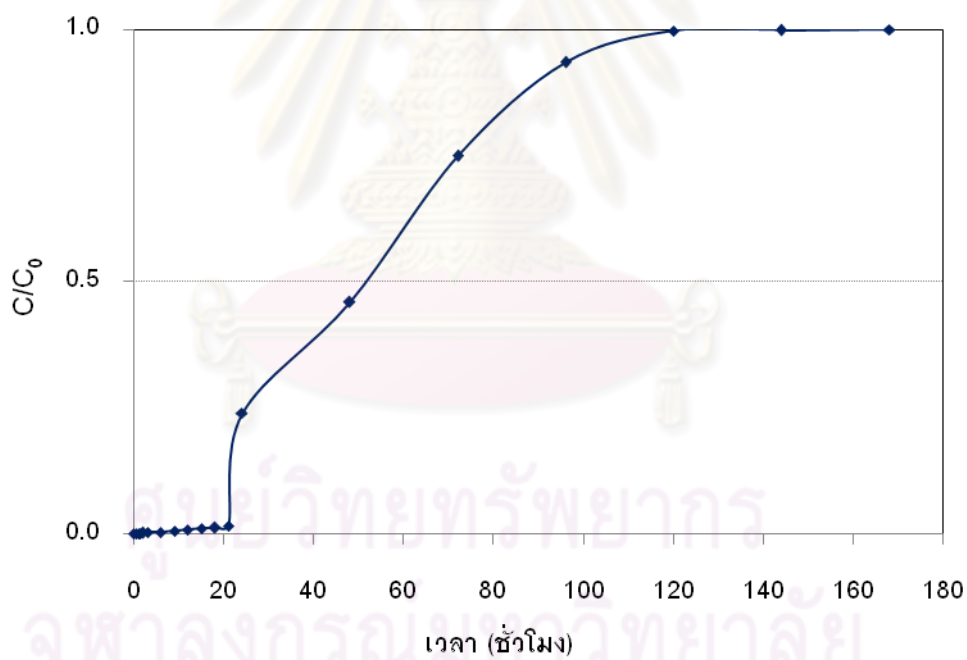
รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บ 100 นาที

4.2.1.6 ผลการทดสอบการดูดติดผิวตะกั่วแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาเก็บ 150 นาที

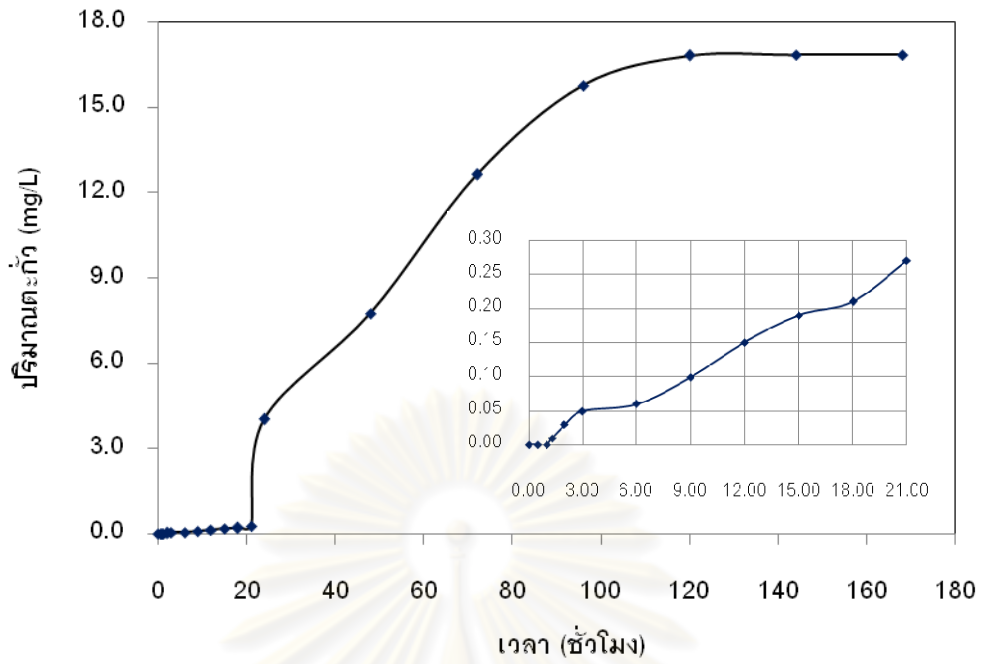
ผลจากการใช้สารดูดซับจากมวลชีวภาพจากสับปะรดในการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บ 150 นาที คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยสู่คอลัมน์เท่ากับ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองเขียนกราฟแสดงเส้นโค้งเบรคทอร์จในคอลัมน์นี้ได้ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 จากการวัดค่าการดูดติดผิวพบว่า ในช่วง 21 ชั่วโมง ที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง คือที่ระยะเวลาการกำจัดผ่านไป 30, 60, 90, 120, 180 นาที 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 ชั่วโมง ปริมาณตะกั่วที่ออกมาจากคอลัมน์มีค่าน้อย คือเท่ากับ 0.00, 0.0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.06, 0.10 และ 0.27 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และในช่วงเวลา 24-96 ชั่วโมง ปริมาณของตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.27 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 15.78 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตจากความชันในช่วงดังกล่าวเมื่อการดูดติดผิวดำเนินไปถึงจุดเบรคทอร์จที่กำหนดให้มีปริมาณของตะกั่ว

ในน้ำเสียเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียเริ่มคงที่ ที่เวลา 120 ชั่วโมง ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่ผ่านการกำจัดประมาณ 16.86 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์หมดสภาพการกำจัด

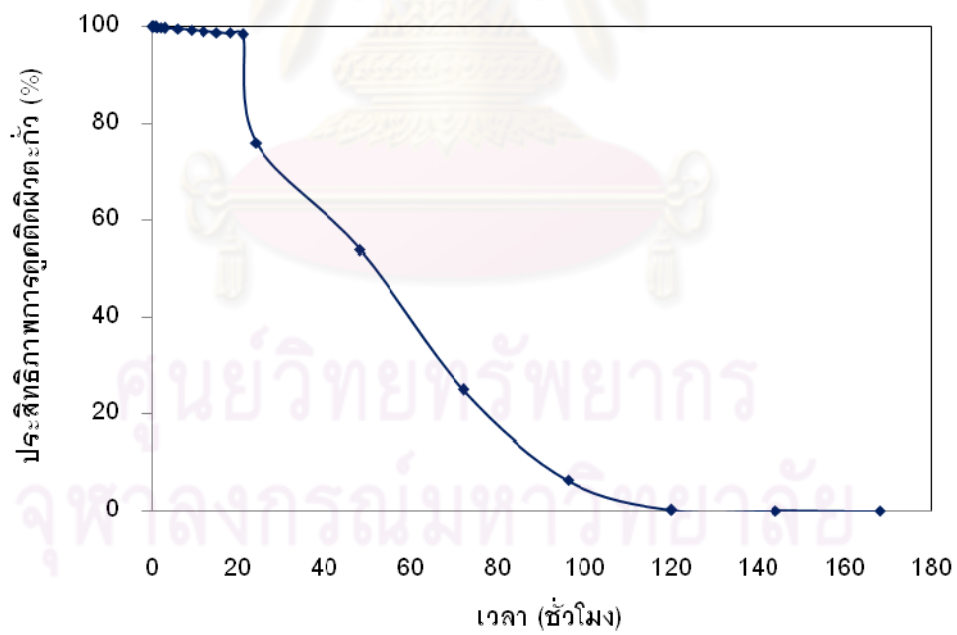
เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัด ดังรูปที่ 4.32 พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดเพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ ที่เวลา 21 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 98.40 ที่เวลา 96 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเท่ากับร้อยละ 6.46 และประสิทธิภาพลดลงทีละน้อยจนถึงที่เวลา 168 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวคงที่ที่ร้อยละ 0.06 คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทูล์เจ็ลียเท่ากับร้อยละ 99.57



รูปที่ 4.30 เส้นโค้งเบรคทูล์เจ็ลียในคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลากักเก็บ 150 นาที (C/C_0)

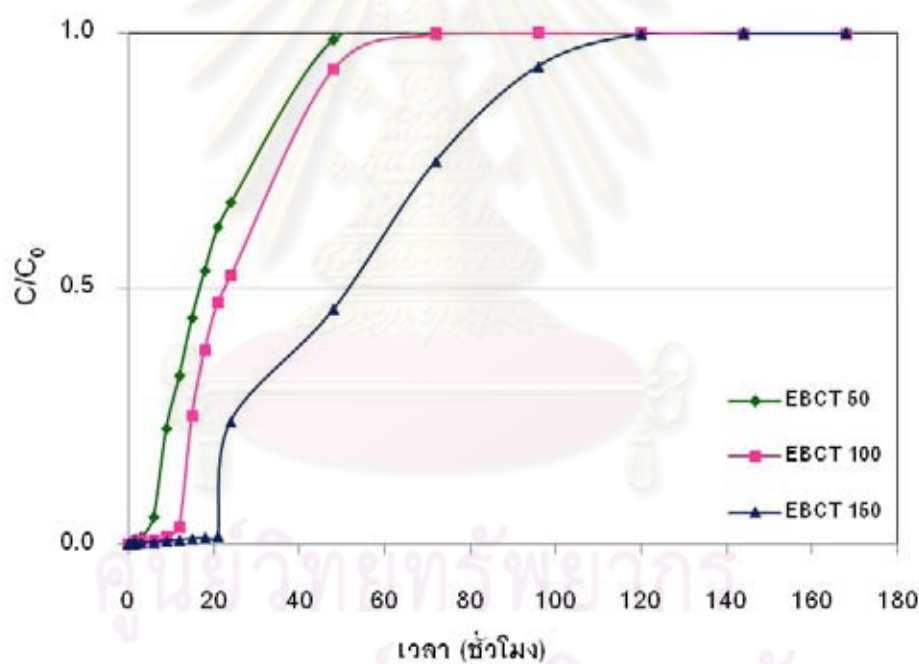


รูปที่ 4.31 การคอลัมน์ดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บ 150 นาที หรืออัตราการไหล 0.6 มล./นาที



รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บ 150 นาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดติดผิวของตะกั่วในคอลัมน์ดูดติดผิว ทั้ง 3 คอลัมน์ ได้แก่ คอลัมน์ A, B และ C (ตารางที่ 4.17) รูปที่ 4.33 พบว่า ในคอลัมน์ที่ C ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทฤษฎ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.57 รองลงมาคือ คอลัมน์ B และ A ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทฤษฎ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.48 และ 99.44 ตามลำดับ เนื่องจากในคอลัมน์ A มีอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เร็วที่สุดคือ 1.8 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ออกมามากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้นเร็วกว่า ในคอลัมน์ B ซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ในขณะที่ในคอลัมน์ C มีอัตราการไหลช้าที่สุดคือ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกั่วที่ผ่านชั้นของมวลชีวภาพที่ละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของตะกั่วออกมากับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัด ในกรณีนี้มวลชีวภาพหรือสารดูดซับจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบเส้นโค้งเบรคทฤษฎ์ในคอลัมน์ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 50, 100 และ 150 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารดีเลตต่อการดูดซับโครเมียม และตะกั่วจากสารละลาย ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และสับปะรด โดยทำการทดลองทั้งแบบแบชต์ และแบบคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม และตะกั่ว ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดพบว่า การใช้ปริมาณมวลชีวภาพ 2.0 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที พีเอช 2 ระยะเวลาในการสัมผัส 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองครั้งนี้ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว ที่ pH ต่ำจะดีกว่าที่ pH สูง เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรดนั้นโครงสร้างของเซลล์โลสจะมีประจุเป็นลบมากขึ้น จึงทำให้เซลล์โลสมีความสามารถในการดูดซับไอออนประจุบวกของโครเมียม และตะกั่วได้ดีกว่าในสภาวะที่เป็นด่าง

5.1.2 ความสามารถของ EDTA มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 150, 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจจะมีผลต่อแรงดึงดูดที่เกิดขึ้น โดยคาดว่าสาร EDTA ที่เพิ่มเข้าไปในระบบนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวของมวลชีวภาพ ซึ่งถ้าเติมสาร EDTA เข้าไปในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมก็สามารถช่วยให้มวลชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดติดโครเมียม และตะกั่วได้มากขึ้น แต่ถ้าเติมสาร EDTA ในระดับที่มากเกินไปก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของมวลชีวภาพลดลงได้

5.1.3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช พบว่าการกำจัดโครเมียม และตะกั่ว ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด พบว่า ค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่า การดูดติดผิวโครเมียม และตะกั่วบนมวลชีวภาพที่ผลิตจากต้น และใบของสับปะรดนั้นเป็นไอโซเทอมแบบแลงมัวร์หรือไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์สำหรับโครเมียม และตะกั่วมีค่า R^2 เท่ากับ 0.993 และ 0.978 ตามลำดับ และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชสำหรับโครเมียม และตะกั่วมีค่า R^2 เท่ากับ 0.981 และ 0.966 ตามลำดับ และความสามารถในการดูดซับโครเมียม และตะกั่ว ของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด คือ 81.15 และ 40.19 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.4 การทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ซึ่งสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียม และตะกั่วให้มีความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม คือ 0.25 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยการทดสอบการดูดซับที่ระยะเวลาเก็บ 3 ค่า คือ 50, 100 และ 150 นาที ซึ่งคิดเป็นอัตราการไหลที่ทำการทดลองคือ 1.8, 1.0 และ 0.6 มิลลิตรต่อนาที พบว่า ในคอลัมน์ที่ระยะเวลาเก็บ 50 นาที มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 96.10 และมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.44 ส่วนในคอลัมน์ที่ระยะเวลาเก็บ 100 นาที มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.00 และมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.48 และในคอลัมน์ที่ระยะเวลาเก็บ 150 นาที มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวโครเมียมจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.46 และมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวตะกั่วจนถึงจุดเบรคทวร์จเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.57 จึงสรุปได้ว่า มวลชีวภาพของต้น และใบของสับปะรดมีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วมากที่สุดที่ระยะเวลาเก็บน้ำตัวอย่าง (EBCT) 150 นาทีหรือที่อัตราการไหลเท่ากับ 0.6 มิลลิตรต่อนาที โดยเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการทดลองแบบคอลัมน์มากกว่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของการทดลองแบบแบตช์ประมาณ 20 เท่า เนื่องจากในการทดลองแบบคอลัมน์ มวลชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับไม่ได้ถูกกวนเช่นเดียวกับการทดลองแบบแบตช์ แต่ถูกบรรจุไว้ในคอลัมน์ ซึ่งทำให้พื้นที่ในการดูดซับของมวลชีวภาพถูกจำกัดจึงไม่สามารถดูดซับสารละลายโครเมียม และตะกั่วได้อย่างเต็มที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรนำมวลดชีวภาพที่ได้จากสับปะรดไปทำการทดลองการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเพราะปัจจุบันสภาวะแวดล้อมกำลังประสบปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการปนเปื้อนจากของเสียอันตราย และสารเคมีอันตรายในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

5.2.2 ควรนำพืชชนิดอื่นๆ ที่เหลือทิ้งจากการใช้ประโยชน์หลักแล้วนำมาใช้ประโยชน์ในการฟื้นฟุน้ำเสียที่ปนเปื้อนเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2539. กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม.
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2.
- เกศสุชา พูลคำ. 2536. การกำจัดโลหะหนักโดยการให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อย
และผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามพิศ แย้มนิยม. 2525. ทรัพยากรแร่ในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: กองเศรษฐกิจ
ธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือก
หอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุรัตน์ เชาเลิศ. 2546. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วย
เกลือโคโคไตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- ชัชฎาพร องอาจ. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน
ไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกากมะพร้าว โดยการปรับ
สภาพด้วยสีย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกฤต เลิศจรสอร่ามดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เถ้า
ฟางข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะ
แวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา นันทพูลทรัพย์. 2544. ผลของความแรงและสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลาย
โคโคไตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- ภาควิชาเคมี. 2542. เคมีทั่วไป, เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมประปา, เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- รัชนีย์ รุกขชาติ. 2544. การกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ควอเทอร์ไนซ์ คลอสลิงค์เซลลูโลสจากต้น
มันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกากมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิมลรัตน์ สังข์คุ้ม. 2545. การดูดซับโลหะหนักโดยสหร่ายมหภาคสีเขียวชนิดช่อพริกไทย.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุปราณี บุระ และคณะ. มปป. การกำจัดโครเมียม (3+) และโครเมียม (6+) จากสารละลายน้ำโดย
สหร่ายสไปรulina และคลอเรลลา. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัย
มหาสารคาม.
- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบุลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และ
การแก้ปัญหา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป.
- ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวภาพ. 2549. ชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
คิวพรีนท์ แมเนจเม้นท์.
- อริชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อ
เก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอมมา อาสนจินดา. 2545. ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตซานแบบ
โครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Baig, T.H., Garcia, A.E., Tiemann, K.J. and Gardea-Torresdey, J.L. 1999. Adsorption of heavy metal ions by the biomass of *Solanum elaeagnifolium* (Silverleaf Night-Shade). Proceeding of the 1999 conference on hazardous waste research. 131-142.
- BASF, AG. 1973. Toxicologie. In Arbeitsschutz, BJ., and Chemikaliengesetz. Risk Assessment Ethylene Diamine Tetraacetic Acid (EDTA). [Online]. Available from: http://ecb.jrc.it/documents/ExistingChemicals/RISK_ASSESSMENT/DRAFT/RO06_1_0302_ev_hh_pdf [2008, July 16]
- Bhargava, D.S., Gupta, M.S. and Varshney, B.S. 1987. use of sawdust for the adsorption of heavy metals. Asian Environment. 9(4): 29-37.

- Chemical. 2003. Chelating agents. [Online]. Available from: <http://www.chemicaland21.com/specialtychem/perchem/CHELATING520AGENTS.htm> [2007, March 22]
- Ertugayand, N. and Bayhan, Y.K. 2007. Biosorption of Chromium(VI) From Aqueous Solution by biomass of *Agaricus bisporus*. Journal of Hazardous Materials. 154: 432-439.
- Gupta, V.K., Shrivastava, A.K. and Jain, N. 2001. Biosorption of Chromium(VI) From Aqueous Solution by Green Algae *Spirogyra* species. Wat. Res. 35(17): 4079.
- Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhair, S. and Khan, E. 2006. Chromium removal from Soil by Phytoremediation with Weed Plant Species in Thailand. In Water, Air and Soil Focus. Springer Netherlands 6(1-2): 191-206.
- Skoog, D.A. and West, D.M. 1979. Analytical Chemistry (Govman, T. ed.). Holt, Rinehart and Winston, U.S.A., 3rd ed, 251-255.
- Srivastara, H.P.C., Mathur, R.P. and Methrotra, I. 1985. Removal of Cadmium from industrial effluents by adsorption on sawdust. Environmental Technology Letter. 7: 55-63.
- Sudha, B.R. and Abraham, T.E. 2001. Biosorption of Cr(VI) from aqueous solution by *Rhizopus nigricans*. Biores. Technol., 79(7): 73.
- Weber, T.W. and Chakravorti, R.K. 1974. Pore and solid diffusion models for fixed bed adsorbers. A.I.Ch.E Journal. 20: 228.
- USEPA. 1992. Chromium, Hexavalent (colorimetric). Method 7196A, Washington D.C., USA.
- USEPA. 1998. Microwave assisted acid digestion of aques samples and extracts. Method 3015A, Washington D.C., USA.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
รูปภาพประกอบการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ ก1 รูป (ก) (ข) (ค) และ (ง) ลักษณะของต้น และใบของสับปะรดที่ถูกตัดก่อนนำมาล้างทำความสะอาด

สะอาด



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ ก2 รูป (ก) และ (ข) ใบของสับปะรดที่ทำความสะอาดแล้ว

รูป (ค) และ (ง) ต้นของสับปะรดที่ทำความสะอาดแล้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 รูป (ก) ตู้อบ (oven) ที่ใช้ในการอบมวลชีวภาพ และรูป (ข) แสดงการอบมวลชีวภาพ



(ก)



(ข)

รูปที่ ก4 รูป (ก) ใบของสับปะรดที่ผ่านการอบแล้ว และ รูป (ข) ต้นของสับปะรดที่ผ่านการอบแล้ว



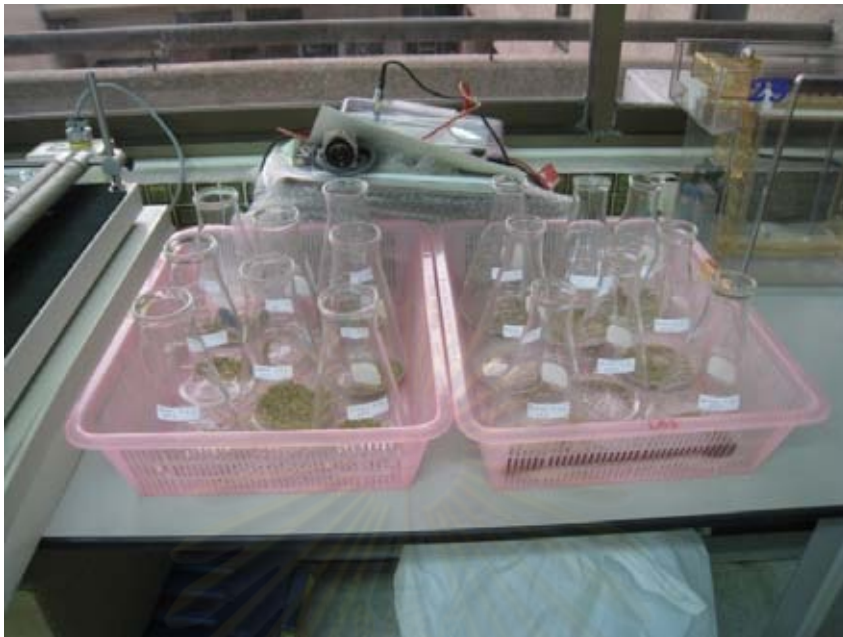
รูปที่ ก5 เครื่องปั่นมวลชีวภาพ



รูปที่ ก6 มวลชีวภาพที่ผ่านการบดแล้ว



รูปที่ ก7 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์



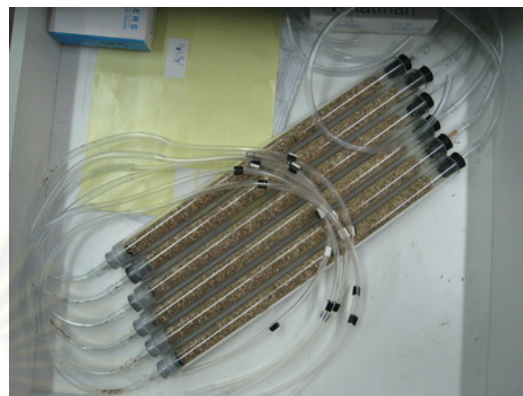
รูปที่ ก8 การเตรียมมวลชีวภาพสำหรับการทดลองแบบแบตเตอรี่



รูปที่ ก9 การทดลองแบบแบตเตอรี่



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 รูป (ก) คอลัมน์ชนิดอะคริลิก และ รูป (ข) คอลัมน์ที่ทำการบรรจุมวลชีวภาพแล้ว



รูปที่ 11 Peristaltic pump



รูปที่ ก12 การทดลองแบบคอลลิมน์



รูปที่ ก13 การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยเครื่อง UV-Spectro photometer



รูปที่ ก14 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ใช้วิธีการของ

USEPA method 7196A



รูปที่ ๓15 เครื่อง Microwave digestion



รูปที่ ๓16 เครื่อง Atomic absorption spectrometer; AAS



ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ และการเตรียมสารเคมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. วิธีการคำนวณการตกตะกอน (%)

ร้อยละของการตกตะกอน =

$$\frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก} - \text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือ}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก}}$$

2. วิธีการคำนวณประสิทธิภาพการดูดติดผิวโลหะหนัก

ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโลหะหนัก =

$$\frac{(\text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือจากการตกตะกอน} - \text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือหลังเติมมวลชีวภาพ}) \times 100}{\text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือจากการตกตะกอน}}$$

3. วิธีการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก คือ

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก =

$$\frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก} - \text{ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่เหลือหลังเติมมวลชีวภาพ}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก}}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การเตรียมสารเคมี

4.1 การเตรียมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 50 มก./ล. จำนวน 1 ลิตร จากสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

$$Cr^{6+} \text{ 50 มิลลิกรัม} = Cr^{6+} \text{ 0.050 กรัม}$$

จากสูตรมวลโมเลกุล Cr^{6+} 51.996 กรัม คิดเป็น 1 โมล

$$\text{ถ้า } Cr^{6+} \text{ 0.050 กรัม คิดเป็น } \frac{0.050 \times 1}{52}$$

$K_2Cr_2O_7$ 1 โมล มีมวลโมเลกุล = 294 กรัม มี Cr^{6+} อยู่ 2 โมล

มี Cr^{6+} 2 โมล อยู่ใน $K_2Cr_2O_7$ 1 โมล

$$\text{ถ้ามี } Cr^{6+} \frac{0.050 \times 1}{51.996} \text{ โมล อยู่ใน } K_2Cr_2O_7 \left[\frac{0.050 \times 1}{51.996} \right] \times \frac{1}{2} \text{ โมล}$$

จาก $K_2Cr_2O_7$ 1 โมล มีมวลโมเลกุล 294 กรัม

$$K_2Cr_2O_7 \frac{0.050}{51.996 \times 2} \text{ โมล มีมวลโมเลกุล } \frac{0.05 \times 294}{51.996 \times 2} = 0.141 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น การเตรียม Cr^{6+} 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก $K_2Cr_2O_7$ ต้องชั่ง $K_2Cr_2O_7$

มาจำนวน 0.141 กรัม แล้วนำมาละลาย และเจือจางด้วยน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร

4.2 การเตรียมตะกั่ว 50 มก./ล. จำนวน 1 ลิตร จากสารละลายมาตรฐาน

ตะกั่ว(II) ไนเตรต ($\text{PbNO}_3)_2$

$$\text{Pb}^{2+} \text{ 50 มิลลิกรัม} = \text{Pb}^{2+} \text{ 0.050 กรัม}$$

จากสูตรมวลโมเลกุล Pb^{2+} 207.2 กรัม คิดเป็น 1 โมล

$$\text{ถ้า } \text{Pb}^{2+} \text{ 0.050 กรัม คิดเป็น } \frac{0.050 \times 1}{207.2}$$

$(\text{PbNO}_3)_2$ 1 โมล มีมวลโมเลกุล = 538 กรัม มี Pb^{2+} อยู่ 1 โมล

มี Pb^{2+} 1 โมล อยู่ใน $(\text{PbNO}_3)_2$ 1 โมล


$$\text{ถ้ามี } \text{Pb}^{2+} \frac{0.050 \times 1 \text{ โมล}}{207.2} \text{ อยู่ใน } (\text{PbNO}_3)_2 \left[\frac{0.050 \times 1}{207.2} \right] \times \frac{1}{1} \text{ โมล}$$

จาก $(\text{PbNO}_3)_2$ 1 โมล มีมวลโมเลกุล 538 กรัม

$$\frac{(\text{PbNO}_3)_2 \text{ 0.050 โมล} \times \text{มวลโมเลกุล } 538}{207.2} = 0.129 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น การเตรียม Pb^{2+} 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก $(\text{PbNO}_3)_2$ ต้องชั่ง $(\text{PbNO}_3)_2$

มาจำนวน 0.129 กรัม แล้วนำมาละลาย และเจือจางด้วยน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร

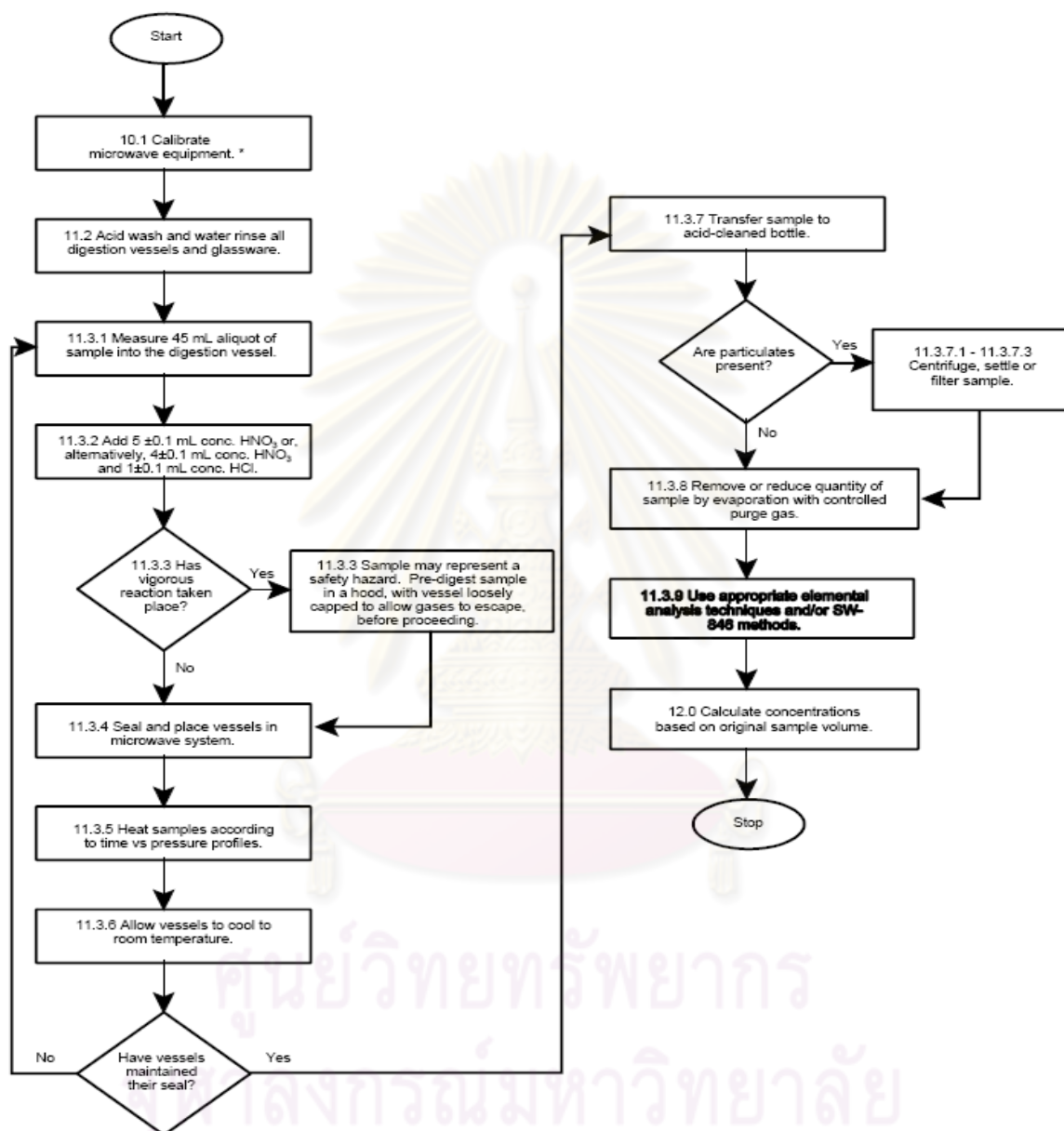


ภาคผนวก ค
วิธีการวิเคราะห์หาโครเมียม และตะกั่วในตัวอย่างน้ำ ตามวิธีการของ
USEPA METHOD 3015A

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

METHOD 3015A

MICROWAVE ASSISTED ACID DIGESTION OF AQUEOUS SAMPLES AND EXTRACTS



* Not necessary if using a unit equipped with temperature feedback control.

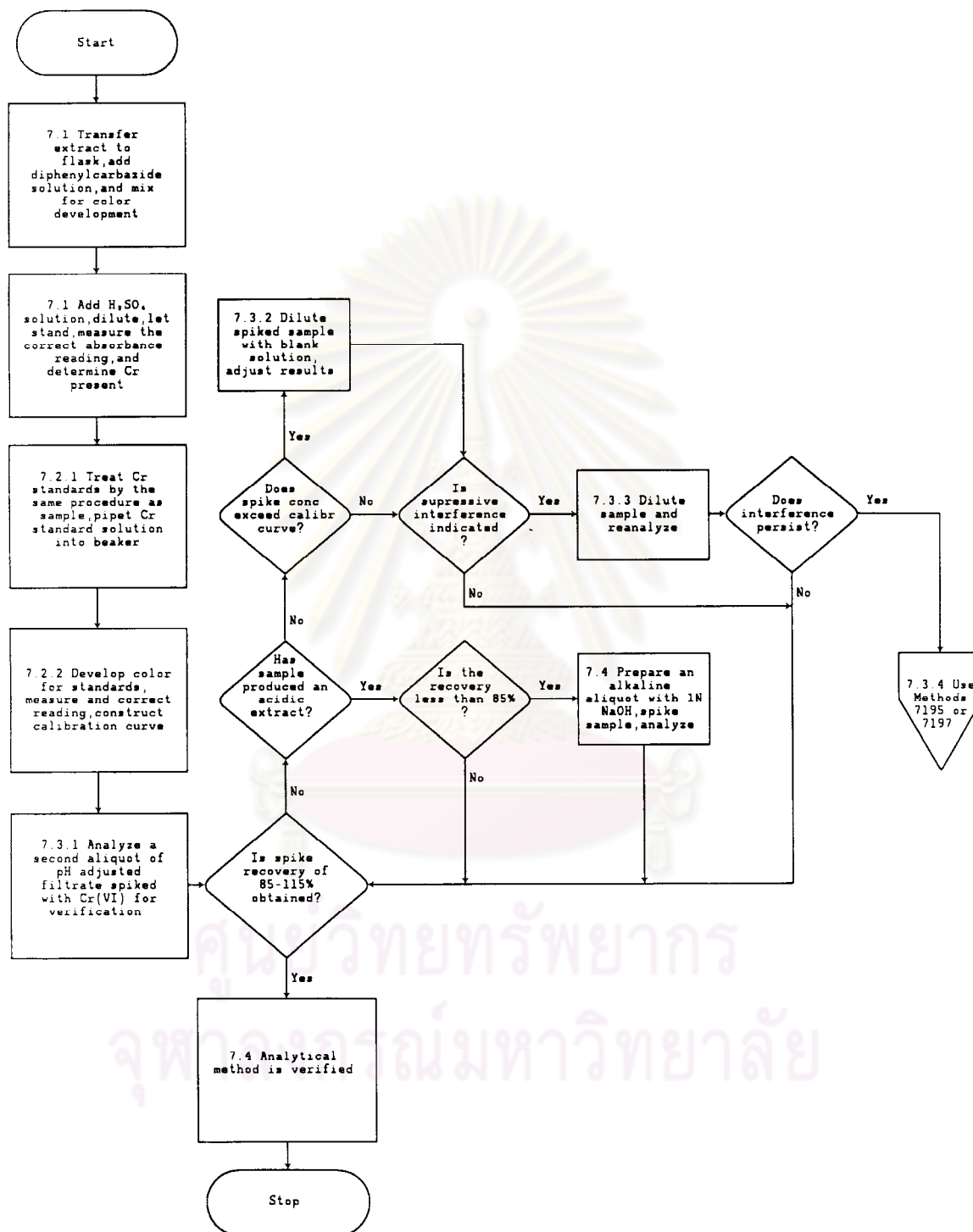


ภาคผนวก ง

วิธีการวิเคราะห์หาค่าโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในตัวอย่างน้ำ ตามวิธีการของ
USEPA METHOD 7196A

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

METHOD 7196A
CHROMIUM, HEXAVALENT (COLORIMETRIC)



Revision 1

รูปที่ ง1 แผนผังการวิเคราะห์โครเมียมตามวิธีการของUSEPA METHOD 7196A



ภาคผนวก จ

บันทึกข้อมูลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 ตารางการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของ
 สับปะรดที่ pH ต่างๆ (ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น = 50 mg/L)

EDTA (mg/l)	pH 2		pH 4		pH 6		pH 10	
	น้ำหนัก	ปริมาณ	น้ำหนัก	ปริมาณ	น้ำหนัก	ปริมาณ	น้ำหนัก	ปริมาณ
	(g)	โครเมียม (mg/L)	(g)	โครเมียม (mg/L)	(g)	โครเมียม (mg/L)	(g)	โครเมียม (mg/L)
0	2.003	10.42	2.001	11.49	2.001	14.93	2.002	14.98
	1.998	9.95	2.007	12.03	2.007	14.89	2.003	16.31
	2.000	11.04	2.003	12.08	2.003	14.88	2.002	14.05
50	2.001	5.43	2.001	6.03	2.001	9.84	2.004	10.39
	1.999	6.05	1.997	7.28	1.993	9.82	2.008	12.85
	2.002	5.84	2.002	7.27	2.005	10.14	2.005	10.40
150	2.004	1.32	2.003	5.78	2.002	6.32	2.002	7.97
	2.007	1.21	1.989	5.81	1.988	6.41	1.992	7.93
	2.004	1.47	2.005	6.02	2.001	7.96	2.004	7.80
300	2.003	10.88	2.001	12.02	2.011	14.49	2.005	15.76
	2.006	11.08	1.997	12.35	1.977	14.83	1.988	16.14
	2.004	11.47	2.004	12.39	2.010	13.87	2.006	15.83
600	2.002	12.85	2.003	13.18	2.001	13.93	2.002	16.94
	1.997	11.93	2.008	14.07	1.999	14.87	2.007	16.88
	2.008	12.90	2.003	13.57	2.003	15.84	2.002	15.87

ตารางที่ ๑2 ตารางการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดที่ pH ต่างๆ (ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น = 50 mg/L)

EDTA (mg/l)	pH 2		pH 4		pH 6		pH 10	
	น้ำหนัก	ปริมาณ โครเมียม	น้ำหนัก	ปริมาณ โครเมียม	น้ำหนัก	ปริมาณ โครเมียม	น้ำหนัก	ปริมาณ โครเมียม
	(g)	(mg/L)	(g)	(mg/L)	(g)	(mg/L)	(g)	(mg/L)
0	2.003	12.84	2.001	12.98	2.001	15.83	2.002	15.84
	1.998	11.98	2.007	13.78	2.007	14.09	2.003	16.73
	2.000	12.09	2.003	14.83	2.003	15.38	2.002	16.79
50	2.001	4.07	2.001	7.08	2.001	9.29	2.004	11.84
	1.999	4.29	1.997	6.75	1.993	9.46	2.008	11.76
	2.002	6.02	2.002	6.68	2.005	8.76	2.005	12.89
150	2.004	1.13	2.003	4.89	2.002	5.79	2.002	5.13
	2.007	1.89	1.989	4.32	1.988	6.15	1.992	7.82
	2.004	2.06	2.005	3.97	2.001	6.34	2.004	7.98
300	2.003	12.59	2.001	14.83	2.011	16.96	2.005	18.01
	2.006	12.46	1.997	14.95	1.977	16.68	1.988	17.03
	2.004	13.15	2.004	13.99	2.010	16.84	2.006	17.38
600	2.002	9.97	2.003	10.88	2.001	14.93	2.002	16.84
	1.997	10.34	2.008	11.43	1.999	15.13	2.007	16.36
	2.008	10.74	2.003	11.58	2.003	15.21	2.002	17.34

ตารางที่ ๑๓ ตารางการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของ
 สับปะรดที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาท)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0	0	18.33	19.72	18.20	18.75	0.00	62.50
	30	16.78	17.73	17.16	17.22	8.14	65.55
	60	16.89	16.72	17.61	17.07	8.94	65.85
	90	16.83	14.62	15.01	15.49	17.40	69.03
	120	14.33	14.29	13.54	14.05	25.05	71.89
	180	12.13	12.37	13.07	12.52	33.21	74.95
	360	11.08	10.52	12.21	11.27	39.89	77.46
	540	11.89	11.09	10.82	11.27	39.91	77.47
	720	10.71	10.86	11.88	11.15	40.53	77.70
50	0	17.76	16.54	16.51	16.94	0.00	66.13
	30	15.84	15.88	16.37	16.03	5.37	67.94
	60	15.33	15.37	16.12	15.61	7.87	68.79
	90	13.98	14.73	14.77	14.49	14.44	71.01
	120	12.5	15.11	13.87	13.83	18.38	72.35
	180	11.83	12.31	11.76	11.97	29.36	76.07
	360	6.88	7.47	6.09	6.81	59.78	86.37
	540	4.84	6.73	5.97	5.85	65.49	88.31
	720	5.98	5.49	5.64	5.70	66.33	88.59
	900	5.34	5.74	6.03	5.70	66.33	88.59

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
150	0	17.74	16.98	17.76	17.49	0.00	65.01
	30	16.84	15.30	17.49	16.54	5.41	66.91
	60	14.73	14.39	13.85	14.32	18.11	71.35
	90	10.84	10.30	11.74	10.96	37.34	78.08
	120	8.70	7.99	8.48	8.39	52.03	83.22
	180	5.20	5.83	4.30	5.11	70.78	89.78
	360	3.21	2.67	4.02	3.30	81.13	93.40
	540	2.01	3.36	2.28	2.55	85.42	94.90
	720	1.43	1.44	1.44	1.44	91.79	97.13
	900	1.21	1.48	1.37	1.35	92.26	97.29
1080	1.35	1.42	1.40	1.39	92.05	97.22	
300	0	19.83	18.68	19.39	19.30	0.00	61.40
	30	17.94	17.48	16.82	17.41	9.78	65.17
	60	16.88	17.04	17.75	17.22	10.76	65.55
	90	15.87	15.78	15.33	15.66	18.86	68.68
	120	13.47	13.46	13.89	13.61	29.50	72.79
	180	11.59	11.53	11.48	11.53	40.24	76.93
	360	11.48	10.56	11.79	11.28	41.57	77.45
	540	11.84	11.68	10.89	11.47	40.57	77.06
	720	10.68	10.98	11.87	11.18	42.09	77.65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
600	0	18.98	19.87	19.74	19.53	0.00	60.94
	30	17.57	18.57	18.45	18.20	6.83	63.61
	60	16.59	16.72	16.88	16.73	14.34	66.54
	90	15.52	15.57	15.59	15.56	20.33	68.88
	120	14.74	14.48	14.49	14.57	25.40	70.86
	180	13.02	13.13	13.30	13.15	32.67	73.70
	360	12.90	12.87	13.03	12.93	33.78	74.13
	540	12.98	11.66	12.97	12.54	35.81	74.93
	720	11.96	12.89	12.67	12.51	35.96	74.99

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑๔ ตารางการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรดที่
เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาท)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0	0	19.34	20.14	19.42	19.63	0.00	60.73
	30	18.94	18.87	19.98	19.26	1.87	61.47
	60	17.75	17.74	16.82	17.44	11.17	65.13
	90	14.33	15.49	16.31	15.38	21.67	69.25
	120	13.43	15.16	16.85	15.15	22.84	69.71
	180	13.09	14.47	13.32	13.63	30.58	72.75
	360	13.18	12.53	12.687	12.80	34.80	74.40
	540	12.93	12.87	11.85	12.55	36.07	74.90
	720	12.97	11.89	12.94	12.60	35.81	74.80
50	0	18.47	18.48	19.37	18.77	0.00	62.45
	30	17.64	17.67	17.83	17.71	5.63	64.57
	60	16.49	17.64	17.47	17.20	8.36	65.60
	90	15.90	16.04	15.87	15.94	15.10	68.13
	120	13.39	14.95	13.44	13.93	25.80	72.15
	180	14.03	14.74	13.82	14.20	24.37	71.61
	360	5.84	5.79	5.88	5.84	68.90	88.33
	540	4.90	4.79	5.74	5.14	72.60	89.71
	720	6.75	4.03	5.01	5.26	71.96	89.47
	900	5.43	4.38	5.80	5.20	72.28	89.59
	1080	4.73	4.87	5.37	4.99	73.42	90.02

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
150	0	16.54	16.72	17.35	16.87	0.00	66.26
	30	15.48	16.04	15.99	15.84	6.13	68.33
	60	14.78	14.3	13.76	14.28	15.35	71.44
	90	13.87	14.37	13.89	14.04	16.76	71.91
	120	12.79	11.47	11.03	11.76	30.27	76.47
	180	8.38	7.47	8.50	8.12	51.89	83.77
	360	7.25	6.73	6.63	6.87	59.28	86.26
	540	6.02	5.77	3.52	5.10	69.75	89.79
	720	2.05	2.13	2.76	2.31	86.29	95.37
	900	1.17	1.47	1.85	1.50	91.13	97.01
	1080	1.14	1.08	1.98	1.40	91.70	97.20
1260	1.36	1.82	1.17	1.45	91.40	97.10	
300	0	20.08	18.26	20.72	19.69	0.00	60.63
	30	19.84	19.47	19.56	19.62	0.34	60.75
	60	18.58	17.58	18.64	18.27	7.23	63.47
	90	16.84	17.23	17.31	17.13	13.02	65.75
	120	15.82	15.47	15.48	15.59	20.82	68.82
	180	14.37	14.39	13.79	14.18	27.97	71.63
	360	12.87	12.67	12.59	12.71	35.45	74.58
	540	12.57	12.34	13.05	12.65	35.74	74.69
	720	12.48	12.88	12.81	12.72	35.38	74.55

EDTA (mg/l)	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การดูดติดผิว (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
600	0	19.04	19.76	18.79	19.20	0.00	61.61
	30	17.85	18.44	17.83	18.04	6.04	63.92
	60	16.49	16.87	17.34	16.90	11.98	66.20
	90	14.78	15.18	15.48	15.15	21.11	69.71
	120	13.85	14.36	14.56	14.26	25.75	71.49
	180	12.42	12.38	12.47	12.42	35.30	75.15
	360	11.04	11.09	10.37	10.83	43.58	78.33
	540	10.34	10.77	11.03	10.71	44.20	78.57
	720	10.76	10.73	10.83	10.77	43.89	78.45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑5 ตารางการดูดติดผิวโครเมียมในคอลัมน์ของมวลชีวภาพจากต้น และใบของด้ปลประรด

โครเมียม (pH 2, EDTA 150 mg/L)									
เวลา (นาท)	EBCT 50			EBCT 100			EBCT 150		
	Cr ⁶⁺ (mg/L)	การดูด ติดผิว (%)	C/C ₀	Cr ⁶⁺ (mg/L)	การดูด ติดผิว (%)	C/C ₀	Cr ⁶⁺ (mg/L)	การดูด ติดผิว (%)	C/C ₀
0	0.00	100.00	0.000	0.00	100.00	0.000	0.000	100.00	0.000
30	0.02	99.89	0.001	0.00	100.00	0.000	0.000	100.00	0.000
60	0.09	99.49	0.005	0.03	99.83	0.002	0.000	100.00	0.000
90	0.11	99.37	0.006	0.04	99.77	0.002	0.020	99.89	0.001
120	0.20	98.86	0.011	0.06	99.66	0.003	0.030	99.83	0.002
180	0.23	98.68	0.013	0.10	99.43	0.006	0.050	99.71	0.003
360	4.13	76.39	0.236	0.13	99.26	0.007	0.070	99.60	0.004
540	6.95	60.26	0.397	0.19	98.91	0.011	0.080	99.54	0.005
720	8.54	51.17	0.488	0.22	98.74	0.013	0.180	98.97	0.010
900	10.24	41.45	0.585	2.73	84.39	0.156	0.200	98.86	0.011
1080	11.03	36.94	0.631	4.84	72.33	0.277	0.230	98.68	0.013
1260	12.20	30.25	0.698	7.33	58.09	0.419	0.270	98.46	0.015
1440	13.27	24.13	0.759	8.78	49.80	0.502	0.900	94.85	0.051
2880	16.31	6.75	0.933	15.36	12.18	0.878	4.760	72.78	0.272
4320	16.83	3.77	0.962	16.97	2.97	0.970	14.770	15.55	0.844
5760	16.85	3.66	0.963	17.02	2.69	0.973	16.830	3.77	0.962
7200	16.85	3.66	0.963	17.00	2.80	0.972	17.340	0.86	0.991
8640	-	-	-	-	-	-	17.471	0.11	0.999
10080	-	-	-	-	-	-	17.474	0.09	0.999

ตารางที่ ๑๖ ตารางการดูดติดผิวตะกั่วในคอลัมน์ของมวลชีวภาพจากต้น และใบของสับปะรด

ตะกั่ว (pH 2, EDTA 150 mg/L)									
เวลา (นาท)	EBCT 50			EBCT 100			EBCT 150		
	Pb ²⁺ (mg/L)	การดูด ติดผิว (%)	C/C ₀	Pb ²⁺ (mg/L)	การดูด ติดผิว (%)	C/C ₀	Pb ²⁺ (mg/L)	การดูด ติดผิว (%)	C/C ₀
0	0.00	100.00	0.000	0.00	100.00	0.000	0.00	100.00	0.000
30	0.01	99.94	0.001	0.00	100.00	0.000	0.00	100.00	0.000
60	0.07	99.59	0.004	0.01	99.94	0.001	0.00	100.00	0.000
90	0.11	99.35	0.007	0.06	99.64	0.004	0.01	99.94	0.001
120	0.18	98.93	0.011	0.05	99.70	0.003	0.03	99.82	0.002
180	0.20	98.81	0.012	0.07	99.59	0.004	0.05	99.70	0.003
360	0.90	94.67	0.053	0.08	99.56	0.004	0.06	99.64	0.004
540	3.82	77.36	0.226	0.26	98.46	0.015	0.10	99.41	0.006
720	5.54	67.16	0.328	0.57	96.62	0.034	0.15	99.11	0.009
900	7.47	55.72	0.443	4.24	74.87	0.251	0.19	98.87	0.011
1080	9.03	46.47	0.535	6.40	62.06	0.379	0.21	98.76	0.012
1260	10.46	38.00	0.620	7.98	52.70	0.473	0.27	98.40	0.016
1440	11.27	33.20	0.668	8.85	47.54	0.525	4.03	76.11	0.239
2880	16.64	1.36	0.986	15.67	7.11	0.929	7.75	54.06	0.459
4320	16.83	0.24	0.998	16.81	0.36	0.996	12.64	25.07	0.749
5760	16.85	0.12	0.999	16.85	0.12	0.999	15.78	6.46	0.935
7200	16.85	0.12	0.999	16.86	0.06	0.999	16.82	0.30	0.997
8640	-	-	-	-	-	-	16.85	0.12	0.999
10080	-	-	-	-	-	-	16.86	0.06	0.999

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกมลทิพย์ ดอกประทุม เกิดเมื่อ วันที่ 13 พฤศจิกายน 2526 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จากคณะศิลปศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เมื่อปีการศึกษา 2549 เข้าศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย เมื่อปี การศึกษา 2550 ในระหว่างการศึกษได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

Kamonthip Dokprathum and Pantawat Sampanpanish. "Effect of EDTA on Cr(VI) Adsorption from Wastewater by Biomass of *Ananas comosus* (L.) Merr." In Proceeding the 2nd CUTSE International Conference 2009, Curtin university of technology, Sarawak Campus. Miri, Sarawak, Malaysia, November 24-25, 2009. (EE_16).

กมลทิพย์ ดอกประทุม และ พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. "ผลของอีดีทีเอต่อการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสีย สังกะระห์ด้วยมวลชีวภาพจากสับปะรด." ในหนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ "พื้นที่เศรษฐกิจชาติ เกษตรศาสตร์ก้าวไกล พิชิตโลก ร้อน" จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการ สื่อสาร สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ณ อาคารศูนย์เรียนรวม 3 วันที่ 3-6 กุมภาพันธ์ 2553. 114-122.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย