

การกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วยเกลือโคโคซาน



นางสาว จารุรัตน์ เชาว์เลิศ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

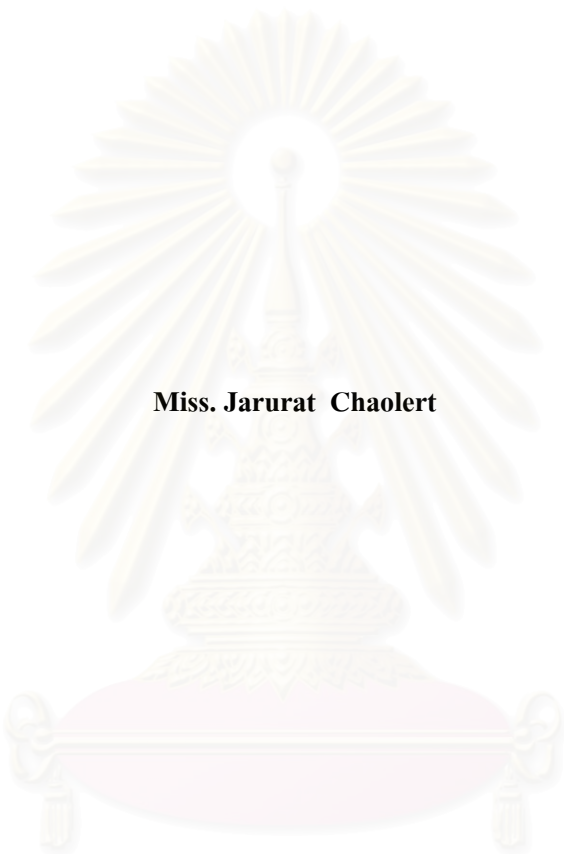
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4792-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**REMOVAL OF LEAD AND MERCURY IN WASTEWATER FROM
ON-NOOCH SOLID WASTE DISPOSAL SITE BY CHITOSAN FLAKES**



Miss. Jarurat Chaolert

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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4792-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วย เกลือโคโคซาน
โดย	นางสาว จารุรัตน์ เชาว์เลิศ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ สุวดี จันทร์กระจ่าง

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. อัจจง ประทีตสุนทรสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ สุวดี จันทร์กระจ่าง)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์)

จารุรัตน์ เชาว์เลิศ : การกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วย
 เกล็ดไคโตซาน (Removal of Lead and Mercury in Wastewater From On-Nooch Solid Waste
 Disposal Site By Chitosan Flakes) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา
 อ.ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์สุวิไล จันทร์กระจ่าง, 146 หน้า. ISBN 974-17-4792-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เกล็ดไคโตซานที่สกัดจากเปลือกกุ้งในการกำจัดตะกั่ว
 และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช โดยสามารถเตรียมเกล็ดไคโตซานที่มีสมบัติร้อยละ
 การกำจัดหมู่อะเซทิลเท่ากับ 90.1 และมวลโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 1.8×10^5 คัดต้น น้ำเสียจากสถานกำจัด
 มูลฝอยอ่อนนุชในช่วงระยะเวลาของการศึกษานี้มีการปนเปื้อนของตะกั่วและปรอทในช่วงความเข้มข้น
 0.2-3.1 มิลลิกรัม/ลิตร และ 2.7-88.1 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ การบำบัดน้ำเริ่มจากการปรับพีเอชของ
 น้ำเสียให้เท่ากับ 6 ใช้เกล็ดไคโตซานขนาด 710-850 ไมโครเมตร ในปริมาณ 20 กรัม ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
 กวนที่ความเร็วเท่ากับ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 สามารถกำจัดตะกั่ว และปรอท ได้ประมาณร้อยละ 94.95 ± 0.01 และ 95.27 ± 0.07 ตามลำดับ อัตราเร็ว
 ของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) ในขั้นตอน Intraparticle diffusion ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมให้ค่าสูงกว่า
 ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว และในน้ำเสียจริง

ไคโตซานมีความสามารถในการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุดเท่ากับ
 1,430 มิลลิกรัมตะกั่ว/กรัมไคโตซาน และ 1,000 มิลลิกรัมปรอท/กรัมไคโตซาน ตามลำดับ การอธิบาย
 กลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยสมการแลงมัวร์ให้ความสัมพันธ์ที่ดีกว่าด้วยสมการพุนดลิตซ์

การบ่มตะกอนไคโตซานหลังการบำบัดที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนแปลงของ
 ตะกั่ว และปรอทเข้าไปในเซลล์แบคทีเรียได้เท่ากับ 0.097 มิลลิกรัม/กรัมไคโตซาน-สปีด้าห์ และ 3.8488
 ไมโครกรัม/กรัมไคโตซาน-สปีด้าห์ ตามลำดับ จากการพิสูจน์เอกลักษณ์พบว่าแบคทีเรียดังกล่าว คือ
Pseudomonas fluorescens, *Acinetobacter sp.* และ *Bacillus spp.*

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา 2546ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4489059320 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : CHITOSAN FLAKES / LEAD AND MERCURY / SOLID WASTE DISPOSAL SITE

JARURAT CHAOLERT : REMOVAL OF LEAD AND MERCURY IN WASTEWATER FROM ON-NOOCH SOLID WASTE DISPOSAL SITE BY CHITOSAN FLAKES. THESIS

ADVISOR : ASSIST. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. SUWALEE CHANDRKRACHANG, 146 pp. ISBN 974-17-4792-6

The aim of this research was to use chitosan flakes prepared from shrimp shells to remove lead and mercury in wastewater from On-Nooch solid waste disposal site. The properties of prepared chitosan in term of degree of deacetylation and average molecular weight were 90.1% and 1.8×10^5 Dalton, respectively. The lead and mercury concentrations in raw wastewater during the study period were 0.2-3.1 mg/l and 2.7-88.1 $\mu\text{g/l}$, respectively. The treatment was done by adjusting the pH of wastewater to be 6. The chitosan flakes were ground to 710-850 μm , stirring 20 g/l of chitosan at 150 rpm for 3 hrs, and settling for 1 h. It was found that the removal efficiencies of lead and mercury were 94.95 ± 0.01 and $95.27 \pm 0.07\%$, respectively. The adsorption rate on intraparticle diffusion stage in binary synthetic water was higher than single and real wastewater.

The maximum removal capacities in synthetic water were 1,430 and 1,000 mg of lead and mercury per gram of chitosan flakes, respectively. The Langmuir isotherm provided better correlation than the Freundlich isotherm.

In incubating the chitosan sludge at 37°C , the transformation rate of lead and mercury into bacterial cells were found to be 0.097 mg/g chitosan-week and 3.8488 $\mu\text{g/g}$ chitosan-week, respectively. These bacteria were identified as *Pseudomonas fluorescens*, *Acinetobacter sp.* and *Bacillus spp.*

Inter-department Environmental Science

Field of study Environmental Science

Academic year 2003

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Coadvisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ สุวดี จันทร์กระจ่าง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิจัย ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย อีกทั้งสละเวลาช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ อาจารย์ ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม และ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์ ที่กรุณาตรวจทาน ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาด้านการวิเคราะห์จุลินทรีย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตร สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สถานกักตมผลฝอยอ่อนนุชทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เก็บน้ำเสียเพื่อใช้ในการวิจัย และข้อมูลที่เป็นสำเนาประกอบงานวิจัย ขอขอบคุณ นางสาวพรรณทิพา กิจภักดีกุล เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สถาบันราชภัฏสวนดุสิต ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการวิเคราะห์โลหะหนัก และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ และวิธีการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจ และคำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง รวมทั้งการอุปการะทางด้านทุนการศึกษาตลอดมา สุดท้ายขอใจเพื่อนๆ ห้อง Non waste สำหรับกำลังใจ กำลังกายต่อสู้กับอุปสรรค และเพื่อนๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ช่วยดูแลด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไคติน และไคโตซาน.....	4
2.2 การดัดแปร.....	8
2.3 สมดุล และไอโซเทิร์มของการดัดแปร.....	12
2.4 โรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช.....	17
2.5 โลหะหนัก.....	24
2.6 จุลินทรีย์ที่ดัดแปรโลหะหนัก.....	31
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 สารเคมี.....	41
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.3.1 ส่วนที่ 1 การเตรียม และลักษณะสมบัติของเกล็ดไคโตซาน.....	43
1. การเตรียมเกล็ดไคโตซานจากเปลือกกุ้ง.....	43
2. การวิเคราะห์สมบัติของเกล็ดไคโตซาน.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 ส่วนที่ 2 การศึกษาความสามารถของเกลือโคโคซาน และการศึกษากลไก	
การกำจัด.....	45
1. การศึกษาความสามารถของโคโคซานในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจาก	
สถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเครื่องจาร์เทส (Jar-test).....	45
2. การศึกษากลไกการกำจัดโลหะหนัก.....	47
3.3.3 ส่วนที่ 3 การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์	
แบบที่เรียในตะกอนโคโคซาน.....	48
1. การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก.....	48
2. การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบบที่เรียในตะกอนโคโคซาน.....	49
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	50
4.1 ผลการเตรียมโคโคติน โคโคซานจากเปลือกกุ้ง.....	50
4.2 สมบัติของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช.....	51
4.3 ค่าพีเอช และอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมที่สุด.....	53
4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย.....	54
4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ.....	55
4.6 ผลการศึกษาการลดค่า COD, BOD และ TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ	
หลังตกตะกอนด้วยโคโคซาน.....	59
4.7 ผลการศึกษากลไกในการกำจัดโลหะหนัก.....	61
4.8 ผลการศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์	
แบบที่เรียในตะกอนโคโคซาน.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก : ผลการทดลอง.....	86
ภาคผนวก ข : การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	133
ภาคผนวก ค : มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำ.....	139
ภาคผนวก ง : ผลการวิเคราะห์สมบัติของไคโตซาน.....	142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	146



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้ไคโตน และไคโตซาน.....	7
2.2 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 1.....	20
2.3 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 2.....	21
2.4 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 3.....	22
2.5 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 4.....	23
2.6 การกำจัดตะกั่ว และประสิทธิภาพการกำจัด.....	28
2.7 การกำจัดปรอท และประสิทธิภาพการกำจัด.....	31
2.8 ประสิทธิภาพการกำจัดของไคโตซาน และอนุพันธ์ของไคโตซานต่อโลหะหนักชนิดต่างๆ.....	36
2.9 การชะโลหะหนักออกจากวัสดุชีวมวลด้วยสารละลายต่างๆ.....	39
3.1 สภาพะในการกำจัดโลหะหนัก.....	46
4.1 สมบัติของไคโตซาน.....	51
4.2 สมบัติของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช.....	52
4.3 อัตราของการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอน Intraparticle diffusion ในการดูดซับตะกั่ว และปรอท ด้วยไคโตซาน.....	59
4.4 ค่าคงที่ที่คำนวณได้จากสมการของแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) และ ฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ในการดูดซับตะกั่ว และปรอทด้วยไคโตซาน.....	63
4.5 หมู่ฟังก์ชันของไคโตซานก่อน และหลังใช้บำบัดกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ.....	67
ก.1 ผลการเตรียมไคติน และไคโตซานจากเปลือกกุ้ง.....	78
ก.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช.....	79
ก.3 ร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล.....	80
ก.4.1 การกำจัดตะกั่วด้วยเกลือไคโตซาน ณ สภาพต่างๆ.....	81
ก.4.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของการกำจัดตะกั่ว ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ.....	82
ก.4.3 การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างสภาพต่างๆ ในการกำจัดตะกั่ว.....	83
ก.4.4 การกำจัดปรอทด้วยเกลือไคโตซาน ณ สภาพต่างๆ.....	84
ก.4.5 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของการกำจัดปรอทใน น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเกลือไคโตซาน.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก.4.6 การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างสภาวะต่างๆ ในการกำจัดปรอท.....	86
ก.5.1 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 3 ชั่วโมง.....	87
ก.5.2 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 6 ชั่วโมง.....	87
ก.5.3 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 12 ชั่วโมง.....	88
ก.5.4 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 3 ชั่วโมง.....	88
ก.5.5 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 6 ชั่วโมง.....	89
ก.5.6 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 12 ชั่วโมง.....	89
ก.6.1 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน 2546).....	90
ก.6.2 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 7 กรกฎาคม 2546).....	91
ก.6.3 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 8 สิงหาคม 2546).....	92
ก.6.4 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน 2546).....	93
ก.6.5 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 7 กรกฎาคม 2546).....	94
ก.6.6 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน 2546).....	95
ก.6.7 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 mg/l).....	96
ก.6.8 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 1.00 mg/l).....	97
ก.6.9 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 0.3 mg/l).....	98
ก.6.10 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 88.00 µg/l).....	99
ก.6.11 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 35.00 µg/l).....	100
ก.6.12 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 µg/l).....	101
ก.6.13 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 mg/l).....	102
ก.6.14 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 1.00 mg/l).....	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก.6.15 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 0.30 mg/l).....	104
ก.6.16 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 88.00 µg/l).....	105
ก.6.17 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 35.00 µg/l).....	106
ก.6.18 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 µg/l).....	107
ก.7.1 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ.....	108
ก.7.2 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ.....	108
ก.7.3 การลดลงของค่า TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ.....	109
ก.8.1 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ กัน.....	110
ก.8.2 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้นต่างๆ กัน.....	111
ก.8.3 ผลของปรอทต่อการกำจัดตะกั่ว.....	112
ก.8.4 ผลของตะกั่วต่อการกำจัดปรอท.....	113
ก.9.1 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ กัน.....	114
ก.9.2 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้นต่างๆ กัน.....	115
ก.10.1 ค่าพีเอชของน้ำกลั่นไม่ปรับค่าพีเอช (Blank).....	116
ก.10.2 ค่าพีเอชของน้ำกลั่นปรับค่าพีเอช เท่ากับ 6	117
ก.10.3 ค่าพีเอชของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ.....	118
ก.10.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	119
ก.10.5 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	120
ก.10.6 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท.....	121
ก.11.1 ปริมาณตะกั่วในเซลล์จูลินทรีย์ (ปริมาณตะกั่วในตะกอนไคโตซานเริ่มต้น 3.0000 mg/).....	122
ก.11.2 ปริมาณปรอทในเซลล์จูลินทรีย์ (ปริมาณปรอทในตะกอนไคโตซานเริ่มต้น 88.1000 µg/l)	123
ก.11.3 ปริมาณตะกั่วในเซลล์จูลินทรีย์ (ปริมาณตะกั่วในตะกอนไคโตซานเริ่มต้น 3.0000 mg/l)...	124
ก.11.4 ปริมาณปรอทในเซลล์จูลินทรีย์ (ปริมาณปรอทในตะกอนไคโตซานเริ่มต้น 88.1000 µg/l)	125
ก.12.1 จำนวนแบคทีเรียที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ.....	126
ก.12.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จำนวนเชื้อ และ รูปร่างเซลล์ในแต่ละสัปดาห์.....	127

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก.12.3 รายละเอียดการตรวจวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย <i>Pseudomonas fluorescens</i>	131
ก.12.4 รายละเอียดการตรวจวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย <i>Acinetobacter sp</i>	132
ค.1 มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน.....	139
ค.2 ความสัมพันธ์ความแรงของกรด และเบส.....	141



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของไคติน และไคโตซาน.....	5
2.2 IR spectra ของไคติน และไคโตซาน.....	6
2.3 NMR spectra ของไคติน และไคโตซาน.....	6
2.4 กลไกการดูดซับ.....	9
2.5 รูปแบบของ Adsorption isotherm ต่างๆ.....	14
2.6 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง.....	15
2.7 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง.....	16
2.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบ Freundlich adsorption isotherm.....	17
2.9 ระบบบำบัดน้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยของสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช.....	18
2.10 วัฏจักรของตะกั่ว และเส้นทางที่ทำอันตรายต่อมนุษย์.....	25
2.11 วัฏจักรของปรอท และเส้นทางที่ทำอันตรายต่อมนุษย์.....	30
2.12 โครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ.....	32
3.1 ขั้นตอนการเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้ง.....	44
3.2 สรุปวิธีการทดลองในส่วนที่ 1 การเตรียม และลักษณะสมบัติของไคโตซาน.....	45
3.3 สรุปวิธีการทดลองในส่วนที่ 2 การศึกษาความสามารถของเกล็ดไคโตซานในการกำจัดโลหะ หนักในน้ำเสีย และการศึกษากลไกการกำจัด.....	48
3.4 สรุปวิธีการทดลองในส่วนที่ 3 การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก รวมทั้งคัดเลือก และ ระบุสายพันธุ์เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนไคโตซาน.....	49
4.1 ไคติน และไคโตซาน.....	50
4.2 คุณภาพน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช ณ วันที่เก็บตัวอย่าง.....	52
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว และปรอทด้วยเกล็ดไคโตซาน ณ สภาวะต่างๆ.....	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ต่อปริมาณเกล็ด ไคโตซานในการกำจัดตะกั่ว และปรอท ณ เวลาในการกวนต่างๆ.....	54
4.5 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับตะกั่ว และปรอท.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ น้ำเสีย สังเคราะห์ตะกั่ว และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอทด้วยไอโคซาน.....	57
4.7 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ น้ำเสีย สังเคราะห์ตะกั่ว และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอทด้วยไอโคซาน.....	58
4.8 ปริมาณตะกั่ว และปรอทที่ถูกดูดซับด้วยไอโคซาน ณ ความเข้มข้นต่างๆ.....	58
4.9 การลดค่า COD, BOD และ TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ.....	60
4.10 สมการการดูดซับตะกั่วด้วยไอโคซาน.....	62
4.11 สมการการดูดซับปรอทด้วยไอโคซาน.....	62
4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียประเภทต่างๆ ในระหว่างการกวน.....	64
4.13 ภาพขยายพื้นผิวของไอโคซานเมื่อดูด้วยกล้อง SEM ก่อน และหลังตกตะกอนกับน้ำเสียจาก สถานกำจัดมูลฝอยๆ และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท.....	65
4.14 ธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของไอโคซานเมื่อดูด้วยเครื่อง EDX ก่อน และหลังตกตะกอนกับน้ำเสีย จากสถานกำจัดมูลฝอยๆ และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท.....	66
4.15 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไอโคซานเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ก่อน และหลังตกตะกอน ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท.....	67
4.16 ปริมาณตะกั่ว และปรอทที่ถูกเปลี่ยนรูปเข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย ณ เวลาในการบ่ม 8 สัปดาห์.....	69
4.17 ปริมาณตะกั่วที่ถูกเปลี่ยนรูปเข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย ตั้งแต่เริ่มต้นการบ่มจนถึงสัปดาห์ที่ 6 ของรูปที่ 4.15 ที่ 37 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส.....	69
4.18 ปริมาณปรอทที่ถูกเปลี่ยนรูปเข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย ตั้งแต่เริ่มต้นการบ่มจนถึงสัปดาห์ที่ 6 ของรูปที่ 4.15 ที่ 37 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส.....	69
4.19 ปริมาณแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในตะกอนไอโคซานหลังการบ่ม ณ เวลาต่างๆ.....	70

รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ

มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
มก./ก.	=	มิลลิกรัมต่อกรัม
มล.	=	มิลลิลิตร
ก./ล.	=	กรัมต่อลิตร
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
mol/g	=	โมลต่อกรัม
g/mol	=	กรัมต่อโมล
°C	=	องศาเซลเซียส
COD	=	Chemical Oxygen demand
BOD	=	Biochemical Oxygen demand
TSS	=	Total Suspended Solid
$[Pb]_{init}$	=	ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชเริ่มต้น
$[Hg]_{init}$	=	ปริมาณปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชเริ่มต้น
BOD_{inf}	=	ค่า BOD ของน้ำเสียก่อนการตกตะกอน
BOD_{eff}	=	ค่า BOD ของน้ำเสียหลังการตกตะกอน
COD_{inf}	=	ค่า COD ของน้ำเสียก่อนการตกตะกอน
COD_{eff}	=	ค่า COD ของน้ำเสียหลังการตกตะกอน
TSS_{inf}	=	ค่า TSS ของน้ำเสียก่อนการตกตะกอนน้ำเสีย
TSS_{eff}	=	ค่า TSS ของน้ำเสียหลังการตกตะกอนน้ำเสีย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

กรุงเทพมหานครมีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นวันละ 9,131 ตัน หรือประมาณ 3.33 ล้านตันต่อปี ส่งผลให้ต้องดำเนินการหาวิธีกำจัดขยะมูลฝอยที่มีประสิทธิภาพเพื่อรองรับปัญหาขยะล้นเมืองที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต (ฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, 2544) ซึ่งการกำจัดขยะมูลฝอยของกรุงเทพมหานครมี 4 วิธี คือ (1) การหมักทำปุ๋ย มีโรงงานหมักทำปุ๋ย 2 แห่ง ตั้งอยู่ที่ซอยอ่อนนุช 3 โรง และที่หนองแขม 1 โรง กำลังการผลิตรวมประมาณวันละ 19 ตัน แต่ในปัจจุบันหยุดดำเนินการ (2) การเผาในเตาเผา ใช้เผามูลฝอยที่คัดแยกออกจากกระบวนการหมักปุ๋ย และเผาขยะติดเชื้อจากสถานพยาบาลต่างๆ ปัจจุบันใช้เฉพาะขยะติดเชื้อรวมประมาณวันละ 10 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 0.1 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด ซึ่งตั้งอยู่ที่ซอยอ่อนนุช (3) การเทกองกลางแจ้ง และ (4) การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล ซึ่งทางกรุงเทพมหานครได้ว่าจ้างภาคเอกชนกำจัด โดยนำขยะจากสถานีขนถ่ายขยะทำแรงแ้ง และโรงงานกำจัดขยะหนองแขม ไปฝังกลบที่สถานฝังกลบอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ประมาณวันละ 5,463 ตันหรือคิดเป็นร้อยละ 59 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด และนำขยะจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชฝังกลบที่ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ประมาณวันละ 3,578 ตัน หรือประมาณร้อยละ 39 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด (กรมควบคุมมลพิษ, 2536 และฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, 2544) แต่อย่างไรก็ตามยังเหลือขยะส่วนหนึ่งที่น่าไปฝังกลบได้ไม่หมดกองทิ้งไว้กลางแจ้งที่สถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช ซึ่งจะเกิดปัญหาน้ำเสียเมื่อมีฝนตกผ่านกองขยะเหล่านี้ได้ และในปัจจุบันสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชมีระบบบำบัดน้ำเสียที่รวบรวมน้ำเสียจากส่วนต่างๆ ดังนี้ (1) น้ำเสียจากกองขยะมูลฝอย โดยในส่วนนี้จะไหลลงร่องดินสู่บ่อรับน้ำเสียรวม แต่ยังมีน้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยบางส่วนไหลลงสู่คลองที่ตัดผ่านกองขยะมูลฝอย (2) น้ำเสียจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูล น้ำเสียส่วนนี้ได้ผ่านการบำบัดด้วยการตกตะกอนทางเคมีก่อนไหลไปรวมกับน้ำเสียจากส่วนอื่นๆ (3) น้ำเสียจากการล้างรถเก็บขยะมูลฝอย และ (4) น้ำเสียจากโรงงานเผาขยะ

ลักษณะของน้ำเสียจากกองขยะมูลฝอย ประกอบด้วยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เกิดจากน้ำฝนที่ไหลผ่านกองขยะชะล้างความสกปรกนั้นออกมา หากขยะมูลฝอยเป็นขยะอันตราย เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ ถ่านไฟฉาย หรือแบตเตอรี่ที่เสื่อมคุณภาพถูกทิ้งปะปนกับขยะมูลฝอยทั่วไปทำให้

น้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยเหล่านั้นมีสารพิษที่เป็นอันตรายปะปนอยู่โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนัก และหากไม่ได้รับการบำบัดที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ โลหะหนักเหล่านี้ก็จะเกิดการสะสมอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ได้

การบำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยสามารถบำบัดได้ทั้งวิธีทางชีวภาพ (Biological processes) วิธีทางกายภาพ (Physical processes) และวิธีทางเคมี (Chemical processes) โดยพบว่าวิธีทางกายภาพ/เคมีเป็นวิธีที่ได้ผลดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก และอนุภาคคอลลอยด์ (Senior, 1995)

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นอนุพันธ์ของไคติน และเป็นไบโอพอลิเมอร์ (Biopolymer) มีสมบัติเป็นประจุบวกย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้ เช่น เป็นตัวกรองเพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์ ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในด้านการแพทย์ และในการกำจัดของเสีย เช่น ตกตะกอนโปรตีน กำจัดโลหะหนัก ยามาแมลง เป็นต้น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2543) แหล่งวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตไคโตซาน คือ เปลือกสัตว์ทะเล เช่น เปลือกกุ้ง กระจงคองปู เป็นต้น วัตถุดิบเหล่านี้จัดเป็นของเสียจากกระบวนการแปรรูปอาหารทะเล และการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์เป็นวิธีการจัดการของเสียอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำไคโตซานไปใช้ในการบำบัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย และศึกษาการย่อยสลายโดยธรรมชาติของตะกอนไคโตซานหลังการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย เพื่อเป็นแนวทางนำไปสู่การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนเหล่านั้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อประยุกต์ใช้เกลือไคโตซานในการกำจัดตะกั่ว และปรอท ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย
2. เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปตะกั่ว และปรอทในตะกอนไคโตซาน
3. เพื่อคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียในตะกอนไคโตซาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมเกลือไคโตซานจากเปลือกกุ้ง ขนาด 710–850 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน
2. ใช้น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช ณ บ่อพักน้ำเสียรวม

3. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer/Flame type (AAS/Flame type) วิเคราะห์ปรอทด้วยเครื่อง AAS ร่วมกับ Hydride Vapour Generator (HVG) และวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer เพื่อตรวจสอบว่าตะกั่ว และปรอทมีปริมาณมากที่สุด

4. คัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบบที่เรียกในตะกอนโคลิโดซาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางการใช้ประโยชน์โคลิโดซานในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อการเปิดตลาดใหม่ของผู้ผลิตโคลิโดซาน
2. องค์กรความรู้กลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยเกลือโคลิโดซาน
3. องค์กรความรู้การเกิดเชื้อจุลินทรีย์บนโคลิโดซานหลังการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก
4. องค์กรความรู้เบื้องต้นการย่อยสลายโดยธรรมชาติของตะกอนโคลิโดซานหลังการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

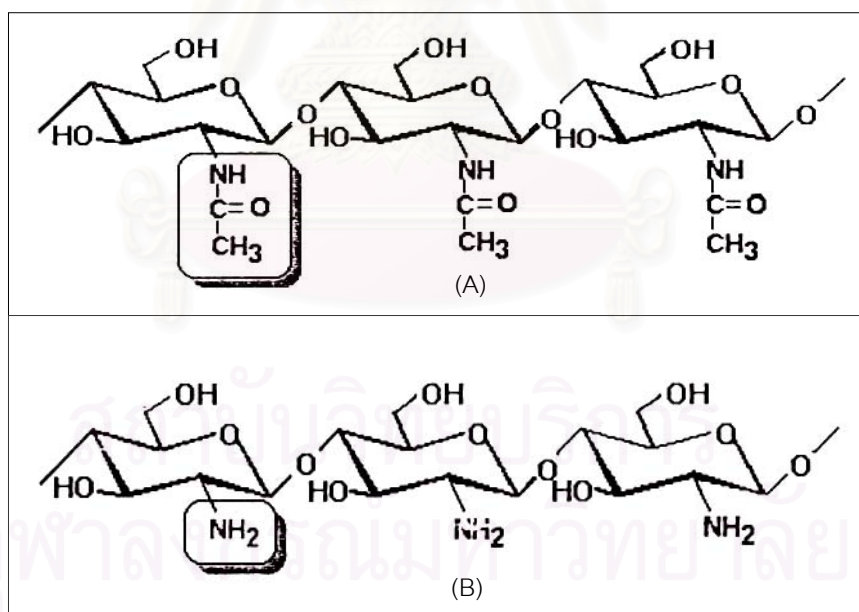
ปัจจุบันได้มีการนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติหลายประการ เช่น เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradation) มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) และไม่มีความเป็นพิษ (Nontoxic) เป็นต้น ดังนั้นจึงปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์และไม่เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม (Bassi et al., 2000)

2.1 ไคติน และไคโตซาน

ไคตินพบมากตามผนังเซลล์ของพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เช่น ในยีสต์ที่ใช้ทำเบียร์และไวน์ พบในส่วนที่กำลังแตกหน่อ ในพืชบางชนิดอาจมีไคตินแทนเซลลูโลส หรืออาจเกิดร่วมกับเซลลูโลสได้ ส่วนในสัตว์จะมีไคตินเป็นคิวติเคิล (Cuticle) ที่ผิวของเนื้อเยื่อบุผิว (Epithelium) แต่โดยมากพบไคตินที่เปลือกของสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง รวมทั้งสัตว์ในพวกครัสเตเชียน (Crustacean) เช่น กุ้ง ปู หอยแมลง และปลาหมึก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในเห็ด รา หลายชนิด เนื่องจากผนังเซลล์มีบทบาทสำคัญในเซลล์ และการเจริญของจุลินทรีย์ (เขาวภา, 2534 Cabib et al., 1996 Knorr, 1991 และ Muzzarelli, 1977)

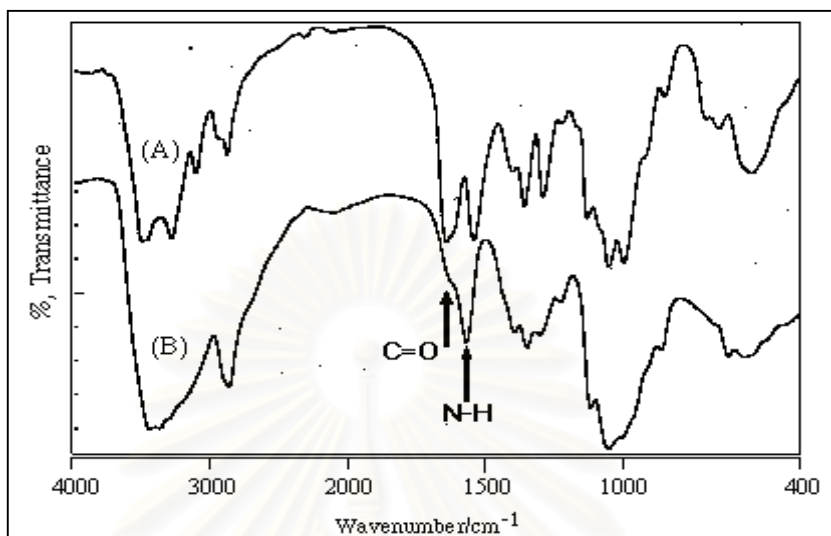
ไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetylglucosamine เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 มีหมู่ Acetylated amino (NH-CO-CH_3) แทนที่จะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ดังในเซลลูโลส ไคตินมีสูตรทั่วไปเป็น $(\text{C}_8\text{H}_{13}\text{NO}_5)_n$ ประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 (Lee V., 1974 อ้างถึงในเกษม, 2543) อย่างไรก็ตามไคตินในธรรมชาติจะมีบางหน่วยที่ไม่มีหมู่อะเซทิล โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ในสายพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคตินพบว่า ไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (Non-electrolytic polymer) ดังแสดงในรูปที่ 2.1(A) ซึ่งทำให้ไคตินไม่ละลายในสารละลายต่างๆ ไปโดยง่าย การใช้ประโยชน์จากไคตินจึงไม่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปลงไคตินโดยวิธีการทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้นคือการเตรียมเป็นไคโตซาน

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการแยกหมู่อะเซทิลออก (Deacetylation) จากไคตินเหลือเป็นหมู่อะมิโนอิสระ(NH_2) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองดังแสดงในรูปที่ 2.1(B) โดยทั่วไปถ้าหมู่อะเซทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 60 จะเรียกว่า ไคโตซาน และถ้าหมู่อะเซทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90-100 จะเรียกว่า Fully deacetylated chitosan (Muzzarelli, 1985) ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และในไคโตซานร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่อะเซทิลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจะไม่แน่นอน และอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89-8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซาน จะเห็นว่าไคโตซานสามารถมีประจุบวกบนหมู่อะมิโนและอาจพิจารณาว่าเป็นพอลิเมอร์ประจุบวกทำให้ไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับ สารอินทรีย์ รวมถึง Polychlorinated biphenyls โปรีดีน และ กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) รวมถึงไอออนโลหะ เนื่องจากสมบัติการดูดซับที่ดีเลิศ ไคโตซานจึงทำหน้าที่เป็นสารจับก้อน (Coagulating agent) ได้ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลายกรดแอสซิดิก เป็นต้น และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ เป็นต้น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคโตซานมีสูงกว่าไคติน การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซานในด้านต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

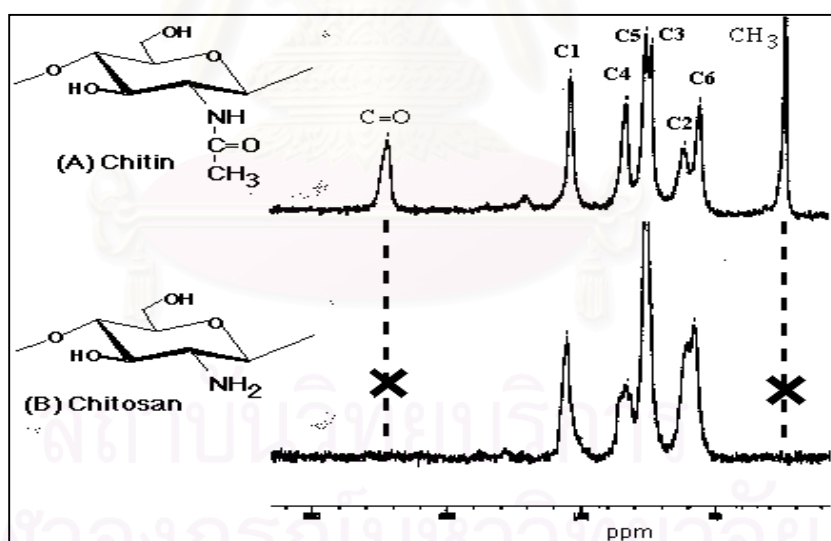


รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของ (A) ไคติน (B) ไคโตซาน (Muzzarelli, 1985)

IR spectra และ NMR spectra ของไคติน และไคโตซานมีโครงสร้างต่างกันดังแสดงในรูป 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 IR spectra ของไคติน (A) และไคโตซาน (B) (Sang, 2003)



รูปที่ 2.3 NMR spectra ของไคติน (A) และไคโตซาน (B) โดยวิธี CP-MAS (Sang, 2003)

ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซาน (Kupongsak, 1995 และ Goosen, 1997)

การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
การบำบัดน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> • การกำจัดโลหะหนัก • ตัวสร้างตะกอน/ตกตะกอน: โพรตีน สี และกรดอะมิโน • ใช้เป็นตัวกรอง (Filtration)
อุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> • เคลือบหน้ากระดาษเพิ่มความแข็งแรง และทำให้เยื่อกระดาษรวมตัว และเกิดฟิล์มที่ต้านน้ำ • เคลือบเส้นใยผ้าเพิ่มการต้านทานน้ำ
ด้านการแพทย์และเภสัช	<ul style="list-style-type: none"> • ผ้าพันแผล (Bandages) • ป้องกันเส้นเลือดอุดตัน ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอลในเลือด • ผลิตแผ่นเยื่อ (Membranes) • ใช้ด้านทันตกรรม/ยับยั้งการเกิดหินปูน • รักษาผิวหนังไหม้/ทำผิวหนังเทียม (Artificial skin) • ตกตะกอนยา และใช้เป็น Drug carrier
เครื่องสำอาง	<ul style="list-style-type: none"> • แป้งแต่งหน้า (Make-up powder) • ผลิตภัณฑ์เคลือบเงาเล็บ (Nail polish) • เพิ่มความชุ่มชื้น (Moisturizer) เป็นส่วนผสมโลชั่นอาบน้ำ (Bath lotion) • ขาสีฟอง • Foam enhancing
เทคโนโลยีชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> • Enzyme immobilization and cell immobilization • Protein separation • Chromatography • Cell recovery • Glucose electrode
การเกษตร	<ul style="list-style-type: none"> • เคลือบเมล็ดพันธุ์พืช • Hydroponic/Fertilizer • Controlled agrochemical release
อาหาร	<ul style="list-style-type: none"> • Removal of dyes, solid, acids • เป็นสารกันเสีย (Preservatives) • เพิ่มความคงทนของสี (Color stabilization) • ส่วนผสมในอาหารสัตว์ (Animal feed additive)
เมมเบรน	<ul style="list-style-type: none"> • Reverse osmosis • Permeability control • Solvent separation

2.2 การดูดซับ (Adsorption)

มีผู้ให้คำนิยามของการดูดซับไว้มากมาย เช่น

การดูดซับเป็นการสะสมสารหรือวัสดุที่พื้นผิวระหว่างของแข็ง และของเหลว รวมถึงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายไปอยู่บนผิวของของแข็ง แต่ไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุให้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสารหรือวัสดุในสารละลาย ตัวทำละลาย หรือพื้นผิวของแข็งลดลงไปนั้นเกิดจากการดูดซับ หรือการตกตะกอนที่พื้นผิว หรือกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน หรือกระบวนการอื่นๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้ว โดยทั่วไปจะใช้คำว่า Sorption (Danals, 1995)

การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย (Adsorbate) จากสถานะที่เป็นของเหลว ไปยังสถานะที่เป็นของแข็งคือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงขับ (Driving force) หลัก 2 ชนิด คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย และสัมพรรคภาพ (Affinity) ของตัวดูดซับที่มีต่อตัวถูกละลาย (วินัย, 2541)

พื้นที่ผิวของของแข็งที่สัมผัสกับสารละลาย และมีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายที่ผิว เนื่องมาจากความไม่สมดุลของแรงที่ผิว (Surface force) เรียกว่า การดูดซับ (Eckenfelder, 1996)

การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือก๊าซ โดยให้สารละลายหรือก๊าซดังกล่าวสัมผัสกับตัวดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ตัวดูดซับชนิดหนึ่งๆ มีความสามารถดูดซับองค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายได้แตกต่างกันจึงสามารถแยกองค์ประกอบต่างๆ ออกจากกันได้ การจะแยกองค์ประกอบออกจากสารละลายนั้นต้องเลือกชนิดตัวดูดซับให้เหมาะสม เมื่อพิจารณาถึงสถานะของสารละลาย และสถานะของตัวดูดซับที่สัมผัสกันแล้วสามารถจำแนกการดูดซับได้เป็น การดูดซับของเหลวโดยของเหลว (Liquid-liquid adsorption) การดูดซับก๊าซโดยของเหลว (Gas-liquid adsorption) การดูดซับของเหลวโดยของแข็ง (Liquid-solid adsorption) (บุญชัย, 2533)

อาจกล่าวโดยสรุปว่า การดูดซับเป็นการแยกสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งเจือปน (Adsorbate) ออกจากของเหลวหรือก๊าซโดยการใช้ของเหลว หรือของแข็งเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent)

2.2.1 กลไกการดูดซับ (Noll et al., 1992 และ Faust et al., 1987)

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk transport เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

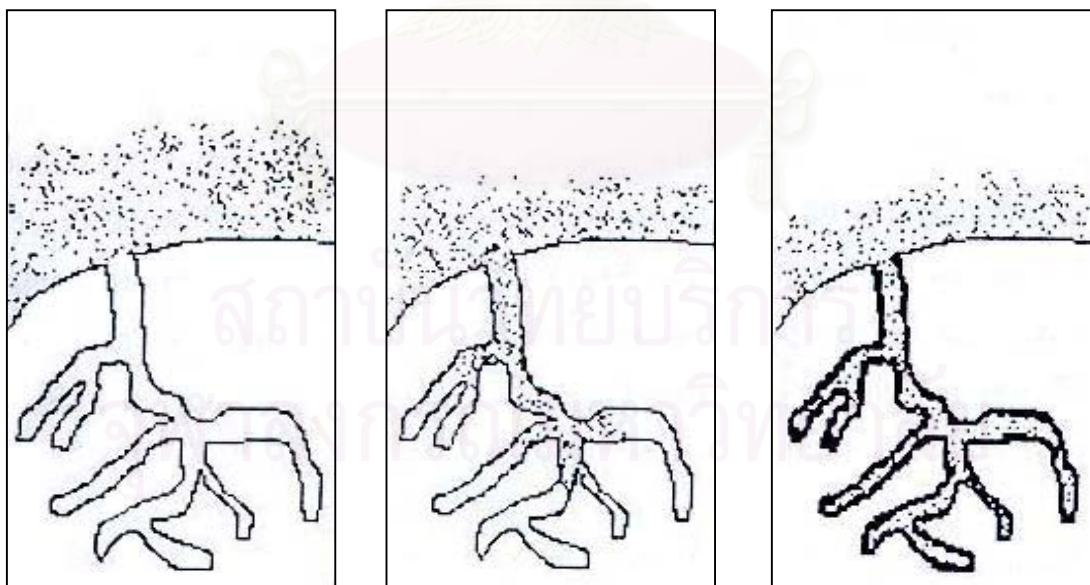
ขั้นตอนที่ 2 Film transport เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับ ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวขั้นตอนหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 3 Intraparticle transport เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และ ทำให้เกิดการดูดซับภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน

ขั้นตอนที่ 1: Bulk transport

ขั้นตอนที่ 2: Film transport

ขั้นตอนที่ 3: Intraparticle transport



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซับ (Noll et al., 1992 และ Faust et al., 1987)

2.2.2 ประเภทของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ประเภท (Slejko, 1985 and Said et al., 1993)

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยในแต่ละชั้นของโมเลกุลจะอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (Reversible)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารที่ถูกดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ

3. การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption)

การดูดซับด้วยประจุเป็นการดูดซับระหว่างตัวที่ถูกดูดซับกับตัวที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (Electrical attraction) ทำให้ไอออนของตัวที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวตัวที่ถูกดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดติดได้ดีกว่าพวกที่มีประจุน้อยๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Said et al., 1993)

1. ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หรือแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวที่ถูกดูดซับจะมี

ความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2. ขนาด และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3. ค่าพีเอช

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าพีเอชสูง ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับ ไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย

เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า แต่ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่นการดูดซับกรดอินทรีย์ โดยถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับ กรดฟอร์มิก กรดแอสติก กรดโพรพิอิก และ กรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

2.3 สมดุล และไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption equilibrium and Adsorption isotherm) (Faust et al., 1987)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ จะมีการคายการดูดซับ (Desorption) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ในที่สุดจำนวนตัวถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง สภาวะที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ เป็นสมบัติจำเพาะ

ของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกดูดซับ ตัวดูดซับ อุณหภูมิ และค่าพีเอช ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปใช้ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

2.3.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

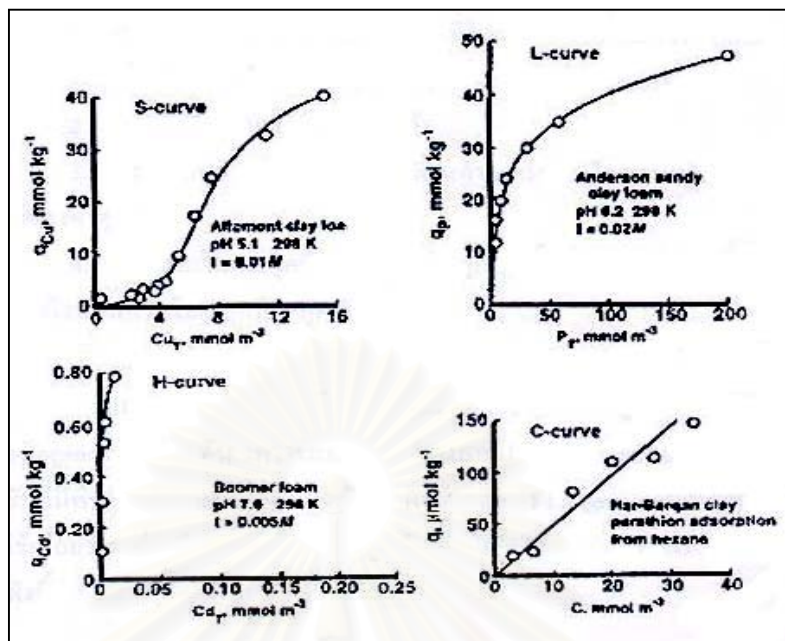
ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสารหรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่างๆ ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (q_e ; มก./ก.) กับความเข้มข้นของสาร หรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ (C_e ; มก./ล.) โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทิร์มใน 4 ลักษณะ คือ S, L, H และ C ซึ่งสามารถจำแนกได้ด้วยลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทิร์มในช่วงเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

S-curve isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะต่ำแล้วจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ในที่สุดก็จะลดลงและเป็น 0 เมื่อพื้นที่ว่างในการดูดซับของสารดูดซับเต็ม ไอโซเทิร์มชนิดนี้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำ พื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีแรงดึงดูดต่อสารที่ถูกดูดซับต่ำ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

L-curve isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะสูงมาก และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น พฤติกรรมการดูดซับเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า สารดูดซับมีแรงดึงดูดหรือมีความสามารถในการดูดซับสารหรือไอออนในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ว่างในการดูดซับมีน้อยลง

H-curve (High affinity) isotherm มีลักษณะความชันในช่วงเริ่มต้นสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับ L-curve isotherm) ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าการดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูง ซึ่งอาจจะเกิด Inner-sphere complexation หรือเกิดปฏิกิริยาดว้แรงวานเดอร์วาลส์ขึ้นในกระบวนการดูดซับ

C-curve isotherm ความชันกราฟนี้จะไม่ผันแปรตามความเข้มข้นของสารละลาย แสดงถึง Partitioning mechanism ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับถูกทำให้แพร่กระจายหรือแยกออกบริเวณใกล้ผิวสัมผัสร่วมของตัวดูดซับ (Interfacial phase) กับสารละลาย โดยปราศจากพันธะจำเพาะใดๆ (Specific bonding) ระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ



รูปที่ 2.5 รูปแบบของ Adsorption isotherm ต่างๆ (Danals, 1995)

2.3.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์ม

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้ถูกนำมาอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับคือ สมการแลงมัวร์ และสมการฟรุนดลิช

1. สมการแลงมัวร์ (Langmuir Equation)

สมมติฐานของสมการแลงมัวร์ คือ

1. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer)
2. การดูดซับสามารถย้อนกลับได้
3. ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของไอออน หรือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของการดูดซับ และไม่เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออน หรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

สมการแลงมัวร์สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2.1)

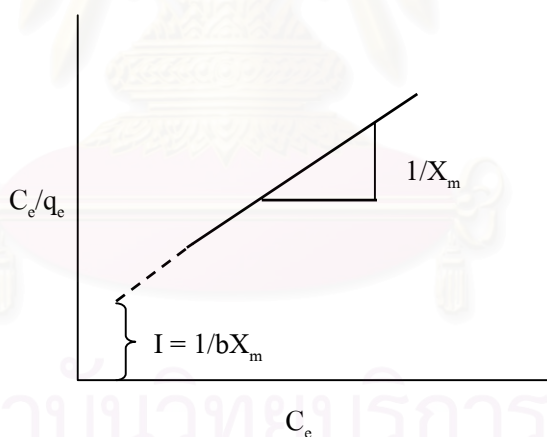
$$q_e = X_m b C_e / (1 + b C_e) \quad (2.1)$$

- เมื่อ q_e = ปริมาณของโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มก./ก.)
 X_m = ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มก./ก.)
 b = ค่าคงที่ของการดูดซับ
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มก./ล.)

จากสมการ (2.1) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงตามสมการ (2.2)

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

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ C_e/q_e เป็นแกน y และ C_e เป็นแกน x จะได้ว่าความชันเท่ากับ $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง (Sunstorm, 1997)

2. สมการฟรุนดลิช (Freundlich Equation)

สมการฟรุนดลิช เป็นสมการการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอการิทึม (Logarithmic) สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2.3)

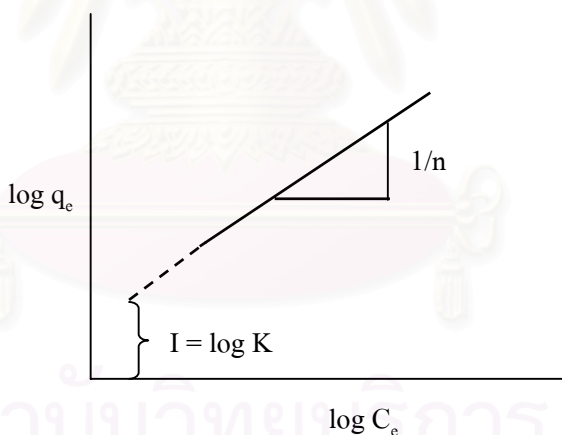
$$q_c = KC_c^{1/n} \quad (2.3)$$

โดย K = สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย (มก./ก.)
 n = Correcting factor (ก./ก.)

จากสมการที่ (2.3) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (2.4)

$$\log q_c = \log K + (1/n) \log C_c \quad (2.4)$$

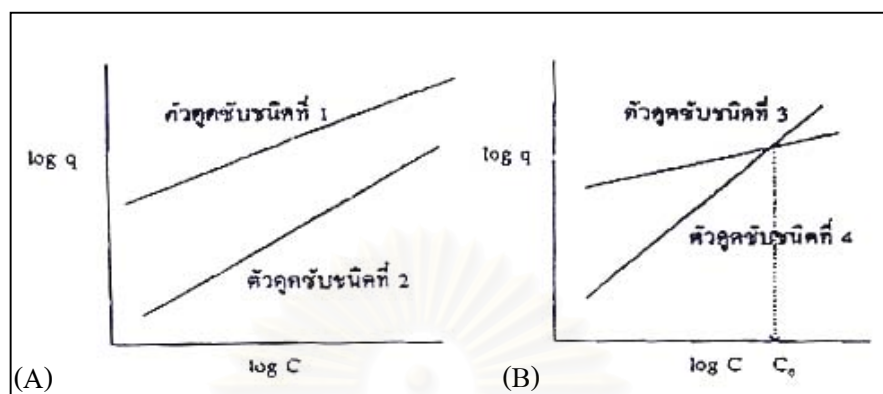
เมื่อนำค่า $\log q_c$ กับ $\log C_c$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q_c$ เป็นแกน y $\log C_c$ เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำ และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดกับแกน x นั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำ หรือสูงจะไม่แตกต่างกันนัก



รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง (Sunstorm, 1997)

สมการฟรุนดลิชจะใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากัน สามารถพิจารณาจากค่าไอโซเทิร์มได้ ดังรูปที่ 2.8 (A) จะเห็นได้ว่าไอโซเทิร์มของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.8 (B) ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทิร์มสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีไอโซเทิร์มที่สูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่า C_0 ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ นอกจากนี้ในรูปที่ 2.8 (B)

ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการบำบัดต่อเนื่อง (Continuous flow) แล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบ Freundlich adsorption isotherm (Sunstorm, 1997)

การศึกษาการดูดซับจะต้องทำให้การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยนำสารละลาย (Adsorption solution) ซึ่งทราบองค์ประกอบ ความเข้มข้น และปริมาตร ผสมเข้ากับสารดูดซับที่ทราบปริมาณที่แน่นอน และทำให้อยู่ในสภาพแขวนลอยก่อนนำไปเขย่า หรือกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ ณ อุณหภูมิ และความดันคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองจนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สมดุล หลังจากทำการดูดซับเข้าสู่สมดุลแล้วทำการแยกสารละลายออกจากสารดูดซับ แล้วจึงนำเอาสารละลายส่วนใสที่แยกได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ จากการทดลองจะทำให้ทราบความเข้มข้นของสารที่สมดุล (C_e) ซึ่งสามารถนำไปสร้างไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เพื่อทำนายถึงความสามารถ หรือพฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้น

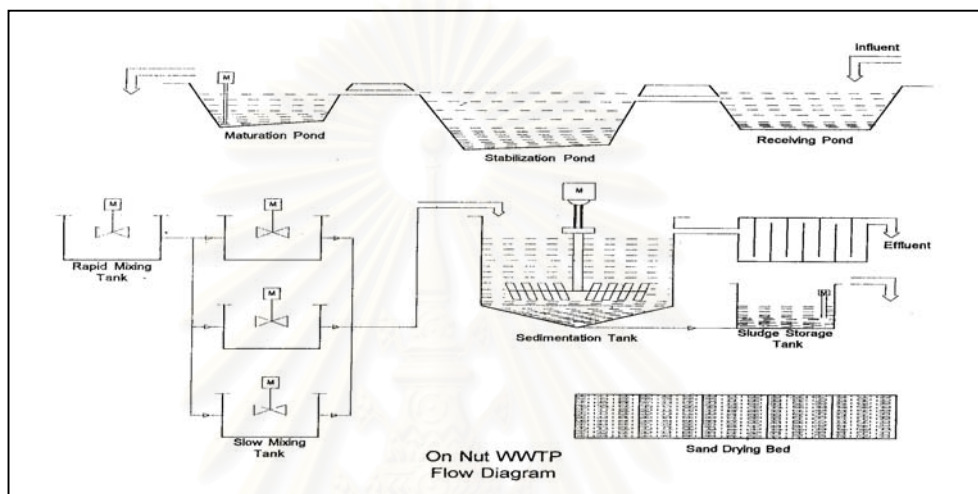
2.4 โรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช

โรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุชเป็นโรงงานบำบัดน้ำเสียที่รวบรวมน้ำเสียจากส่วนต่างๆ ดังนี้

1. น้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยจะไหลลงร่องดินสู่บ่อรับน้ำเสียรวม แต่ยังมีน้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยบางส่วนไหลลงสู่คลองที่ตัดผ่านกองขยะมูลฝอย
2. น้ำเสียจากโรงงานบำบัดสิ่งปฏิกูลโดยน้ำเสียส่วนนี้ได้ผ่านการบำบัดด้วยการตกตะกอนทางเคมีก่อนไหลไปรวมกับน้ำเสียจากส่วนอื่นๆ
3. น้ำเสียจากการล้างรถเก็บขยะมูลฝอย
4. น้ำเสียจากโรงงานเผาขยะ

2.4.1 ระบบบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยจะไหลตามรางรับน้ำมายังบ่อรับน้ำเสีย (Receiving pond) เป็นบ่อแรก ระบบบำบัดน้ำเสียใช้ระบบชีววิทยาแบบบ่อฝิ่ง และแบบเคมี (Biological and Chemical treatment) โดยการบำบัดใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ในถังกวนเร็วและถังกวนช้าเป็นสารตกตะกอน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ระบบบำบัดน้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยของสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช (Sivapornpun, 2000)

1. ระบบบำบัดชีวภาพ

บ่อรับน้ำเสียเป็นบ่อดินสามารถรับน้ำเสียได้ 6,090 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำหน้าที่กักน้ำเสียก่อนที่จะไหลต่อไปยังบ่อ Stabilization และ Maturation ตามลำดับ ภายในบ่อ Maturation ติดตั้งเครื่องสูบน้ำแบบใต้น้ำ (Submersible pump) จำนวน 2 เครื่อง อัตราการไหล 112 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง เครื่องสูบน้ำจะทำงานเพียงหนึ่งเครื่องและสำรองหนึ่งเครื่อง ท่อน้ำออกมีวาล์วเปิด-ปิด เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลย้อนกลับ ก่อนที่น้ำเสียไหลลงถังกวนเร็วจะมีท่อจ่ายสารเคมีเชื่อมต่อเข้ากับท่อส่งน้ำเสียไปยังถังกวนเร็ว

2. ถังกวนเร็ว (Rapid mixing tank)

ถังกวนเร็วใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที จากนั้นน้ำเสียที่ผสมสารเคมีแล้วจะไหลผ่านท่อไปยังถังกวนช้า โรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุชใช้สารเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารตกตะกอน โดยทั่วไปสารเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถทำงานได้ที่พีเอชต่ำกว่าเกลือของอลูมิเนียมซึ่งเกิดจากการเติม

สารส้มในน้ำ สารเฟอริคคลอไรด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ที่ช่วงพีเอชกว้าง กล่าวคือสามารถทำงานได้ในช่วงพีเอช 3.8-11 ซึ่งเป็นประโยชน์เนื่องจากสารเฟอริคคลอไรด์สามารถทำปฏิกิริยาเพื่อตกตะกอนโดยไม่ต้องสิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอชของน้ำก่อนบำบัด

3. ถังกวนช้า (Slow mixing tank)

ถังกวนช้าทำหน้าที่รับน้ำเสียที่ผสมสารเฟอริคคลอไรด์จากถังกวนเร็วโดยหลังจากที่น้ำเสียผสมสารเฟอริคคลอไรด์แล้วจะเกิดเป็น絮 (Floc) ขึ้น ดังนั้นจึงต้องลดอัตราเร็วของการกวนเพื่อไม่ให้絮เล็กๆที่เกิดขึ้นเกิดการแตกตัวและเพื่อให้絮ที่เกิดขึ้นมีโอกาสจับกันเป็นตะกอนใหญ่ กระบวนการที่เกิดในถังกวนช้าเรียกว่า Flocculation ภายในถังกวนช้าจะมีการกวนเบาๆและใช้เวลานานเพื่อให้絮เล็กๆในน้ำจับตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่โดยทั่วไปในการกวนช้าใช้เวลาประมาณ 20-30 นาที หลังจากนั้นน้ำจากถังนี้จะไหลลงถึงตกตะกอนเพื่อตกตะกอนแยกของแข็งออกจากน้ำต่อไป

4. ถังตกตะกอน (Sedimentation tank)

ตะกอนที่จับตัวกันเป็นก้อน และมีขนาดใหญ่จะถูกแยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัด โดยการตกตะกอนในถังตกตะกอน ก่อนจะไหลออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป

5. บ่อเก็บตะกอน (Sludge storage tank)

บ่อเก็บตะกอนเป็นบ่อ เพื่อสูบตะกอนที่เก็บไว้ในบ่อไปยังลานตากตะกอน

6. ลานตากตะกอน (Sand drying bed)

ภายในลานตากตะกอนจะมีทรายเพื่อทำหน้าที่กรอง และแยกน้ำออกจากตะกอน น้ำส่วนที่ไหลผ่านชั้นกรองทรายลงด้านล่างจะมีรังกน้ำเพื่อรองรับและนำน้ำกลับไปที่บำบัด ส่วนตะกอนที่ค้างอยู่ส่วนบนของลานตากตะกอนจะผ่านขั้นตอนการตากให้แห้งด้วยแสงแดดก่อนที่จะนำไปกำจัดต่อไป

2.4.2 ลักษณะของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช

ลักษณะของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชจากการศึกษาของผู้วิจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 ถึง 2.5

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 1 (Chang, 1988)

พารามิเตอร์	Date			
	19 Oct 1987	4 Nov 1987	23 Nov 1987	15 Jan 1988
Weather	Clear	Clear	Clear	Clear
Temp (°C)	35	26	32	37
Temp of leachate (°C)	30	28	27	27
pH	8.02	7.6	7.9	8
Color (Hazen)	6,000	5,500	5,500	4,500
Turbidity	180	160	170	900
Alkalinity (as CaCO ₃)	2,100	2,650	220	3,250
SS	220	166	250	79
TS	6,500	6,324	6,600	5,156
DO	0.8	0.5	0.6	0.3
BOD	210	190	180	150
COD	1,825	2,075	1,658	1,560
NH ₃ -N	252	415	482	546
Organic-N	44	45	73	81
TKN	296	460	555	627
TP	10.2	7.1	5.2	16.9
Pb	0.089	0.1	0.07	0.03
Cd	0.009	0.007	0.01	0.07*
Cr	1.114*	1.04*	0.66*	1.32*
Hg	0.007*	0.012*	0.006*	0.025*

หมายเหตุ *: เกินมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน (ตารางที่ ก-1 ภาคผนวก ก)

หน่วยของทุกพารามิเตอร์ คือ มก./ล. ยกเว้น pH และ Color

ตารางที่ 2.3 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 2 (กรณีสำรวจ, 2535)

พารามิเตอร์		ปริมาณ	
		บ่อรับน้ำเสียรวม	น้ำหลังบำบัด
Temp (°C)	May	29.7	31.2
	July	30.7	29.6
pH (pH unit)	May	8	7.2
	July	8.1	7.3
DO (mg/l)	May	0.27	1.11
	July	0.09	0.91
Conductivity (µmhos/cm)	May	25,509	3,067
	July	19,086	2,979
Salinity (ppt)	May	13.7	0.9
	July	10	1
Alkalinity (mg/l)	May	587	20
	July	523	35
BOD (mg/l)	May	268	41
	July	493	22
COD (mg/l)	May	6,380	183
	July	4,147	311
SS (mg/l)	May	174	40
	July	187	82
DS (mg/l)	May	12,425	1,728
	July	12,110	1,730
TSS (mg/l)	May	12,583	1,769
	July	12,297	1,812
Mercury (ppb)	May	20.71*	1.16
	July	3.73	0.9
Cadmium (mg/l)	May	Non Detectable	Non Detectable
	July		
Manganese (mg/l)	May	0.68	0.54
	July	0.83	0.71

หมายเหตุ *: เกินมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน (ตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 3 (วีรวรรณ, 2530)*

พารามิเตอร์	หน่วย	ปริมาณ
pH	-	7.0-8.6
TS	mg/l	3,275-21,541.6
TVS	mg/l	958-8,176
TSS	mg/l	81.9-2,732
TVSS	mg/l	51.7-1,015.4
TOC	mg/l	750-2,875
COD	mg/l	986.7-9,214.6
BOD	mg/l	178.2-1,881.1
TKN	mg/l as NH ₃ -N	298.7-2,198.6
Organic-N	mg/l as NH ₃ -N	101.2-440.3
NH ₃ -N	mg/l	197.5-1,758.3
Total-P	mg/l as P	18.4-69.5
Total-Alkalinity	mg/l as CaCO ₃	850-9,150
VFA	mg/l as CH ₃ COOH	110-912.7
Chloride	mg/l	97.6-2,355.4
Sulphate	mg/l	42.7-340.2
Fat Oil and Grease	mg/l	575-2,176.4
PCB	mg/l	<0.7
Chromium	mg/l	<1.0**
Mercury	mg/l	3.8-4.7**
Color	Pt-Co Scale	2,550-45,450
Conductivity	μmhos/cm	0.575×10 ⁴ – 4.2×10 ⁴
Odor	-	Earthy Smell ammoniacal

หมายเหตุ *: เก็บจากบ่อกู้จุดเทกอง

** : เกินมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน (ตารางที่ ก-1 ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช 4 (Sivapornpun, 2000)

พารามิเตอร์	ปริมาณ
Age (years)	20
pH	7.5
TS	11,324
TSS	488
TDS	10,836
TSS/TS ratio	0.043
COD	1,200
BOD	130
BOD/COD ratio	0.11
NH ₃	700
Hg	0.684*
Pb	0.519*
Ni	0.035
Cd	Non detectable

หมายเหตุ *: เกินมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน (ตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค)

หน่วยของทุกพารามิเตอร์ คือ มก./ล. ยกเว้น Age และ pH

จากตารางแสดงลักษณะของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชของผู้วิจัยต่างๆ พบว่า ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียฯ มีค่าเกินกว่ามาตรฐานน้ำผิวดินที่กำหนดไว้ในตารางที่ ค-1 ของภาคผนวก ค โดยในการศึกษาของ Chang (1988) พบปริมาณของแคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และปรอท อยู่ในช่วง 0.007-0.07, 0.66-1.32, 0.03-0.1 และ 0.006-0.025 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ แต่การศึกษาของ ธรณิศวรร และ ธารศ (1993) ทำการตรวจวัดปรอทในเดือนพฤษภาคม และเดือนกรกฎาคม พบว่า มีปรอทปนเปื้อนโดยเฉลี่ย 0.02 และ 0.003 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนการศึกษาของ วีรวรรณ (2530) ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย ณ บ่อรับน้ำชะมูลฝอยรวมระหว่างเดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนมกราคม พบว่ามีปรอทปนเปื้อนในช่วง 3.8-4.7 มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณโครเมียมน้อยกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร และการศึกษาของ Sivapornpun (2000) ในเดือนมีนาคม พบปริมาณ ปรอท และตะกั่ว เฉลี่ยประมาณ 0.684 และ 0.519 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมไม่สามารถตรวจวัดได้

2.5 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 เท่าตัวขึ้นไป มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติที่ค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสม และตกค้างอยู่ในธรรมชาติได้นาน และเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ ตัวอย่างของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) สังกะสี (Zn) เป็นต้น โลหะหนักที่พบมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สมบัติทางกายภาพของโลหะ คือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปแบบซึ่งมีความเสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดไปสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปทางห่วงโซ่อาหาร (Food chain) (เกศสุชา, 2537)

2.5.1 ตะกั่ว (Lead: Pb) (Fergusson, 1990)

ตะกั่ว เป็นธาตุหมู่ 4A ทุกธาตุในหมู่นี้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ตะกั่วมีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย ความหนาแน่น 11.3 กรัม/ลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,744 องศาเซลเซียส พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน ชั้นที่ 1+2 เป็น 2,167 กิโลจูล/โมล ชั้นที่ 1+2+3+4 เป็น 9,330 กิโลจูล/โมล สภาพไฟฟ้าลบเท่ากับ 1.55 การนำไฟฟ้าคือออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป PbO , PbO_2 และ PbO_3 ซึ่ง Pb^{2+} จะเสถียรมากกว่า Pb^{4+} แก๊สของตะกั่ว $2+$ โดยทั่วไปจะไม่ละลายน้ำ ยกเว้นอะซิเตด และไนเตรท เมื่อละลายน้ำก็จะให้ไอออน Pb^{2+} ที่ถูกไฮเดรต Pb^{2+} แก๊สของตะกั่ว $2+$ ทุกชนิดละลายได้ในเบสให้พลัมไบต์ $Pb(OH)_4^{2-}$

1. ประโยชน์ของตะกั่ว

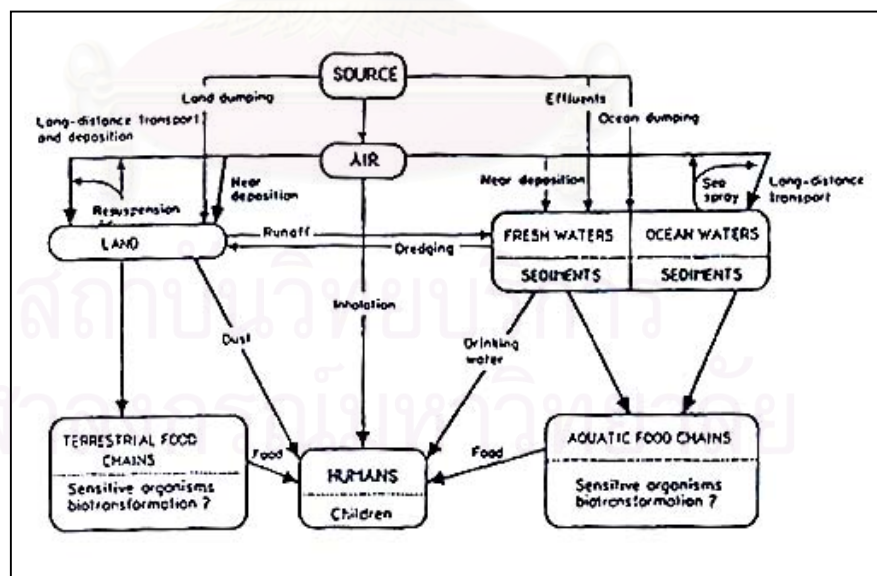
ประมาณหนึ่งในสามของผลผลิตนำไปใช้ในรูปของตะกั่วออกไซด์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีแดง (Red lead) และสีขาว (Lead carbonate) ตะกั่วขาวและแดงใช้ในการทำสี ตะกั่วสีส้มเป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมกระจก ทำหม้อแบตเตอรี่ และโลหะหุ้มสายเคเบิล ใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมทำท่อต่างๆ ใช้ในการผลิตกระสุนปืน และในอุตสาหกรรมผสมโลหะผสม เช่น ตะกั่วผสมดีบุก เป็นโลหะบัดกรี (Solder) ตะกั่วผสมพลวง เป็นโลหะตัวพิมพ์ (Type metal) และ ตะกั่วผสมดีบุกและทองแดง เป็นโลหะพิวเตอร์ (Pewter)

2. พิษของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะมีพิษที่สามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ ตะกั่วนั้นมีอยู่ทั้งในรูปสารตะกั่วอินทรีย์และอนินทรีย์ ตะกั่วอนินทรีย์เป็นตะกั่วที่เป็นโลหะหรือสารประกอบ เช่น ตะกั่วออกไซด์และตะกั่วซัลเฟต ส่วนตะกั่วอินทรีย์คือ Alkyl lead ที่ใช้ในน้ำมันเชื้อเพลิง ตะกั่วอนินทรีย์ทำให้เกิดพิษเฉียบพลันและเรื้อรังต่อระบบประสาท การได้รับพิษนั้นเกิดจากการหายใจเอาฝุ่น หรือควันของตะกั่วเข้าไป จะทำให้เกิดอาการปวดท้อง เบื่ออาหาร กล้ามเนื้อหมดแรง เกิดตะคริว และมีผลต่อการสร้างเม็ดเลือดแดง ถ้าสัมผัสตะกั่วมานานๆ จะพบว่าการสะสมของตะกั่วในกระดูก เลือด ทำให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซม และอาจทำให้เกิดการแท้งในหญิงมีครรภ์ ส่วนตะกั่วอินทรีย์จะเป็นอันตรายต่อระบบประสาท

3. การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและผลต่อมนุษย์ของตะกั่ว

ตะกั่วพบได้ทั้งในอากาศ ดิน น้ำ พืช และเครื่องใช้ในครัวเรือน การปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม เกิดขึ้นเนื่องจากการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และจากน้ำฝนที่ชะล้างสารตะกั่วจากอากาศ และพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ แหล่งกำเนิดของตะกั่ว และเส้นทางที่ทำอันตรายต่อมนุษย์แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วัฏจักรของตะกั่ว และเส้นทางที่ทำอันตรายต่อมนุษย์ (Fergusson, 1990)

4. วิธีการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

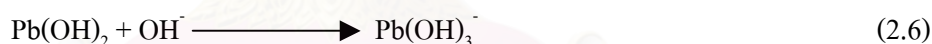
ตะกั่วเป็นสารละลายที่ไม่สลายตัวตามธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งาน หรือจากกิจกรรมอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ความรู้ทางเคมีของตะกั่วในน้ำเสียมีการศึกษากันน้อย ส่วนใหญ่อ้างอิงจากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติ หรือน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ซึ่งสรุปได้ว่าความสามารถในการละลายของตะกั่วในน้ำเสียขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ความกระด้าง ความเป็นด่าง และสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Nayer และ Dague, 1975) ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้

(1) ผลของพีเอช

การละลายของสารตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูปของสารละลาย ที่พีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ดังสมการ (2.5)



แต่เนื่องจากสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการ (2.6)

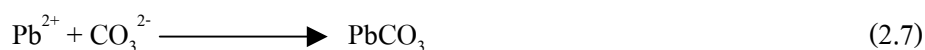


(2) ผลของความกระด้าง

การละลายของตะกั่วถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ที่พีเอชนี้ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ประจุลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม และแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

(3) ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่ว และคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอช และความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน ที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ (2.7)



ที่พีเอช 8.5-12.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ดังสมการ (2.5) หรืออาจจะตกตะกอนในรูป Basic lead carbonate ดังสมการ (2.8)



และที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ตามสมการ (2.6)

(4) ผลของสารอินทรีย์ (Tunay et al., 1994)

ความสามารถในการละลายของตะกั่วจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีสารอินทรีย์โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นสารคีเลต (Chelating agent) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับตะกั่วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วได้ ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วเพิ่มมากขึ้น

ปัจจุบันการกำจัดตะกั่วที่อยู่ในรูปสารละลายเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีในการเปลี่ยนสารละลายตะกั่วให้เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ โดยการเติมสารเคมีบางประเภท เช่น ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($\text{Pb}(\text{OH})_2$) เติมนโซเดียมคาร์บอเนต ($\text{Na}_2(\text{CO}_3)$) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต (PbCO_3) และเติมฟอสเฟตเพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วฟอสเฟต ($\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารส้ม เพอรัส และเพอริกซัลเฟตเป็นสารตกตะกอนในการกำจัดตะกั่วในกระบวนการทำให้ตะกั่วตกตะกอน โดยทั่วไปนิยมที่จะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต และตะกั่วไฮดรอกไซด์ ตะกั่วคาร์บอเนตจะตกตะกอนได้มากกว่าตะกั่วไฮดรอกไซด์ซึ่งมีผลต่อกระบวนการที่ตามมา คือต้องมีถึงตกตะกอน และการเอาน้ำออกจากตะกอน (Sludge dewatering)

ตารางที่ 2.6 สรุปวิธีการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีการต่างๆ และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของแต่ละวิธี โดยวิธีการตกตะกอนเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีกำจัดตะกั่วที่มีราคาถูก แต่ก็พบปัญหาในการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้น พีเอชหลังการบำบัดค่อนข้างสูง และการนำตะกั่วกลับมาใช้ใหม่ค่อนข้างยาก

ตารางที่ 2.6 การกำจัดตะกั่ว และประสิทธิภาพการกำจัด (Patterson, 1985)

วิธีการกำจัด	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นของตะกั่ว (มิลลิกรัม/ลิตร)		
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
Ion exchange	5.0-5.2	0.1	0.01	90
Ion exchange*	-	0.055	0.0015	97.3
	-	126.7-144.8	0.020-0.053	99.9
Lime-sedimentation	8.3	11.7	0.27	97.7
	7.1	0.91	0.19	79.1
	8.2	1.2	0.15	87.5
	-	30	1	96
	-	6.5	0.1	98.5
	-	0.31	0.1	97
Lime-5-hr sedimentation	7.7	98	39	40
Lime-30-hr sedimentation	6.8	-	0.48	-
Caustic-1-hr sedimentation	5.5	-	1.6	-
Caustic-24-hr sedimentation	7.0	-	0.04	-
Ammonium hydroxide	7.8	-	23.9	-
Lime-ferric sulfate	10.0	5.0	0.25	95
Lime-ferric sulfate +sedimentation+filtration*			0.029	99.4
Lime-sedimentation	11.5	5.0	0.20	96
Lime-sedimentation +filtration			0.019	99.6
Filtration	9.5	0.9-4.6	0.11-0.21	-
	9.5	0.9-4.6	0.10-0.17	-
Caustic-soda ash*	9.0-9.5	5.0	0.01-0.03	99
Sodium carbonate+filtration*	6.4-8.7	10.2-70.0	0.2-3.6	82-99
Ferric sulfate+sedimentation	6.0	5.0	0.25	95
Ferric sulfate+sedimentation +filtration*	6.0	5.0	0.03	99.4
Ferrous sulfate+sedimentation	10.4-10.8	45	1.7	96.2

* Pilot-plant result

2.5.2 ปรอท (Mercury: Hg) (Fergusson, 1990)

ปรอท เป็น โลหะสีขาวคล้ายเงินในสภาพที่มีความบริสุทธิ์ ๓ อุณหภูมิปกติจะมีสถานะเป็นของเหลว ปรอทแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบ คือ ปรอทในรูปโลหะ (Metallic form) ปรอทในรูปสารอนินทรีย์ (Inorganic mercury compound) และ ปรอทในรูปสารอินทรีย์ (Organic mercury compound) ปรอทที่อยู่ในรูปของโลหะ โดยมากเป็นพวกบริสุทธิ์ไม่ผสมกับสารอื่น ปรอทมีน้ำหนักโมเลกุล 200.59 ความหนาแน่น 13.546 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส จุดเดือด 356.9 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็ง -38.87 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 13.545 สภาพไฟฟ้าลบเท่ากับ 1.44 เลขออกซิเดชัน เป็น +1 และ +2 ความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ เกือบของปรอทส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ ยกเว้น ซัลไฟด์ ไอโอไดด์ ฟอสเฟต และออกซาลेट

1. ประโยชน์ของปรอท

ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ต่างๆ เช่น เทอร์มอมิเตอร์ บารอมิเตอร์ ในด้านการแพทย์ คือ ส่วนผสมของยารักษาโรคหลายชนิด ใช้ในการอุดฟันและเป็นองค์ประกอบในเครื่องมือแพทย์ เช่น เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความดันโลหิต (Blood pressure) ในด้านการเกษตร คือ สารประกอบของปรอททั้งที่เป็นสารอินทรีย์และ สารอนินทรีย์ ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืช และยาฆ่าเชื้อราในพืช ทำให้ป้องกันเชื้อราที่เกิดกับเมล็ดพืชที่เก็บรักษาไว้นานๆ ได้ ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้า การผลิตกระดาษ สี น้ำยาซักแห้ง คลอรีน โซดาไฟ และการทำขนเฟอร์ เป็นต้น

2. พิษของปรอท

สารปรอทเมื่อเข้าสู่ร่างกายอาจจะเป็นพิษภัยมาก เพราะปรอทจะไปจับตัวแบบพันธะโคเวเลนต์กับ โปรตีน ซึ่งจับถ่ายออกไปได้ช้ามาก พิษภัยที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ของปรอท จะทำให้ผิวหนังเนื้อเยื่อต่างๆ มีความซึมซาบผ่านได้ยาก เป็นเหตุให้เซลล์แห่ง อंत्रายหรือพิษของปรอท นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของสารปรอทที่พบ การสูดไอปรอทเข้าสู่ปอดทำให้เกิดอันตรายได้ นอกจากนี้ ไอปรอทยังสามารถซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังได้

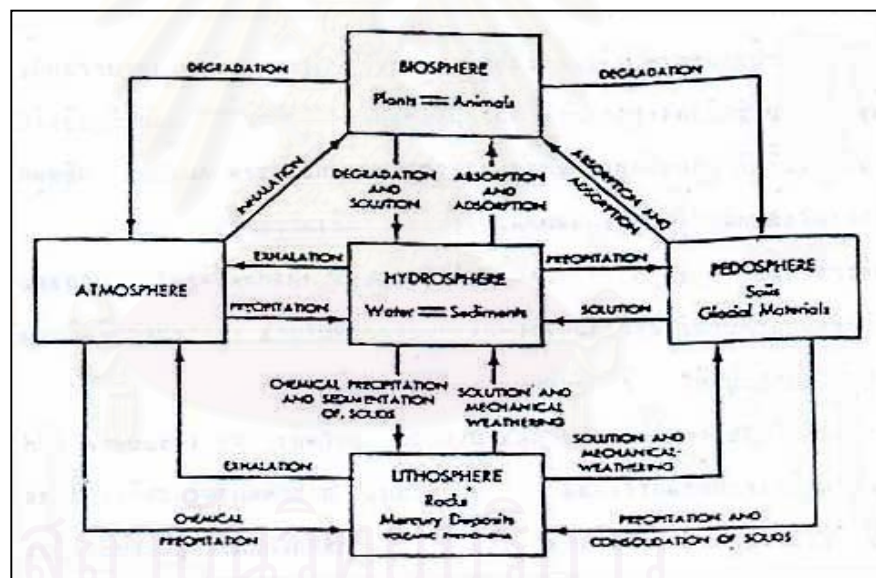
3. การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อมนุษย์ของปรอท

แหล่งกำเนิดใหญ่ของปรอทในสิ่งแวดล้อมได้มาจากการกร่อน (Erosion) และการชะละลาย (Leaching) สารปรอทที่เกิดขึ้นเองด้วยกระบวนการทางธรณีวิทยาตามธรรมชาติ โดยน้ำฝน จากนั้นจะไหลลงสู่ลำธาร ทะเลสาบ และซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ดังรูปที่ 2.11 และการเข้าสู่ร่างกายของปรอทมีได้ 3 ทาง คือ

(1) ทางผิวหนัง: ปรอทสามารถซึมผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกายได้ ทำให้เกิดอันตรายต่อผิวหนังและกล้ามเนื้อบริเวณนั้น

(2) ทางปาก: ถ้ามีปริมาณมากเกินไปความต้านทานของร่างกายจะเกิดโทษต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้ปวดกระเพาะ อาเจียนบ่อยครั้งและมีเลือดปนออกมาด้วย

(3) หายใจ: ไอปรอทอาจซึมเข้าสู่ปอดแล้วซึมผ่านไปในกระแสโลหิตและสะสมอยู่ในอวัยวะต่างๆ ส่วนใหญ่มักสะสมที่ไต เพราะไตเป็นส่วนที่เลือดผ่านมากที่สุด



รูปที่ 2.11 วัฏจักรของปรอท และเส้นทางที่ทำอันตรายต่อมนุษย์ (Fergusson, 1990)

4. วิธีการกำจัดปรอทในน้ำเสีย

การกำจัดปรอทในน้ำเสียได้แก่ (1) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (2) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กำจัดปรอทในรูปอนินทรีย์ ฟิเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดจะอยู่ในช่วงเป็นกรดเล็กน้อย (3) การจับก้อน (Coagulation) สารที่นิยมใช้คือ อะลูมิเนียมซัลไฟด์ เพอริกคลอไรด์ โดยจะใช้กำจัดปรอททั้งรูปอนินทรีย์ และอนินทรีย์ (4) การรีดิวซ์ (Reduction) สามารถ

กำจัดปรอทในรูปอนินทรีย์ สารรีดิวซ์ที่ใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม (Aluminum) สังกะสี (Zinc) ไฮดราซีน (Hydrazine) และ โซเดียมบอโรไฮไดรไรด์ (Sodium borohydride) ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การกำจัดปรอท และประสิทธิภาพการกำจัด (Patterson, 1985)

วิธีการกำจัด	ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถบำบัดได้ (ไมโครกรัม/ลิตร)
Sulfate precipitation	10-20
Ion exchange	1-5
Alum coagulation	1-10
Iron coagulation	0.5-5
Activated carbon	
High initial Hg	20
Moderate initial Hg	2.0
Low initial Hg	0.25

2.6 จุลินทรีย์ที่ดูดซับโลหะหนัก (Prasad, 2001)

จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักมีหลายประเภท ทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ รา และสาหร่าย กระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยวัสดุชีวมวลเริ่มจากการสัมผัสกับสารละลายโลหะหนัก โดยวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับอาจมีชีวิตหรือตายแล้ว อาจอยู่แบบเซลล์เดี่ยวๆ หรือถูกตรึงเป็นเม็ดหรือฟิล์มก็ได้ วัสดุชีวมวลเหล่านี้สามารถดูดซับโลหะหนักมาเก็บไว้ที่ผนังเซลล์ และภายในเซลล์โดยกระบวนการต่างๆ หลายกระบวนการร่วมกัน เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตมีสมบัติร่วมกันประการหนึ่ง คือความสามารถที่จะสะสมสารต่างๆ จากสิ่งแวดล้อมไว้ในตัวโดยไม่คำนึงถึงสารนั้นจะมีพิษหรือไม่ (Rose, 1976) สมบัติข้อนี้เห็นได้ในพวกจุลินทรีย์ ได้แก่แบคทีเรีย โดยแบ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ และสมบัติในการดูดซับโลหะหนักของแบคทีเรียเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผนังเซลล์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สำคัญในการดูดซับโลหะหนักของแบคทีเรีย ดังนั้นแบคทีเรียจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามองค์ประกอบของผนังเซลล์ที่แตกต่างกัน (Caldwell, 2000) คือ

1. แบคทีเรียแกรมบวก (Gram positive bacteria) (Caldwell, 2000)

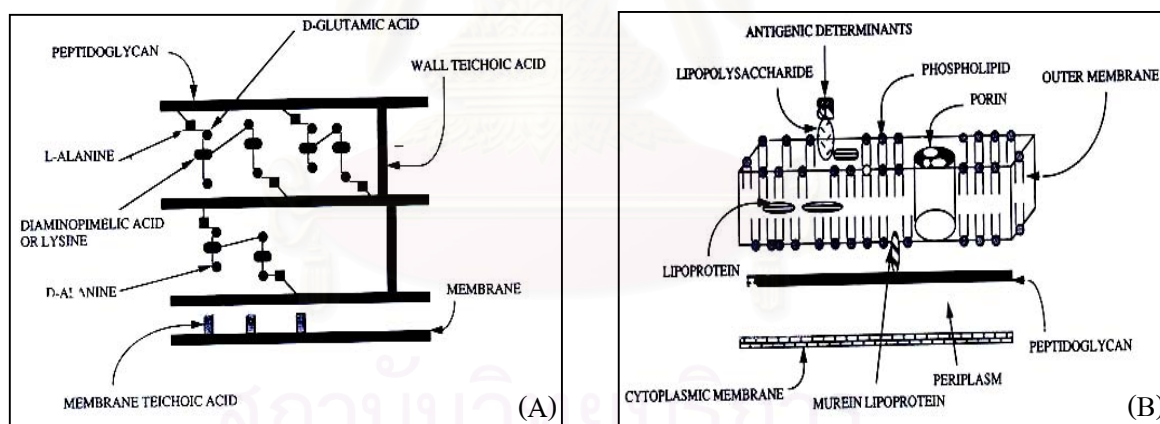
ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- Polymeric network เป็นส่วนของสารที่แข็งแรงมาก และสารที่ยึดหยุ่นได้ เช่น เปปติโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งมีรูปร่างเป็นเส้นใยตรง มีพันธะโควาเลนต์กับเส้นใยอื่นๆ เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ เรียกว่า Murein sacculas

- Secondary polymer เป็นส่วนที่เป็นเปปติโดไกลแคนที่ยาวกว่า และยึดหยุ่นกว่าส่วนแรก นอกจากนี้ยังมีกรดไทโคอิก (Teichoic) ซึ่งมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรงของ กลีเซอรอลฟอสเฟต (Glycerol phosphate) และสามารถซึมผ่านช่องว่างใน โมเลกุลของ Murein framework ผนังเซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะมีประจุลบเนื่องจากมีกรดไทโคอิก และกรดไทคูโรนิก (Teichuronic) ติดอยู่ที่โครงร่างข่ายของเปปติโดไกลแคน ซึ่งฟอสโฟไดเอสเทอร์ (Phosphodiester) ของกรดไทโคอิก และหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดไทคูโรนิกมีส่วนสำคัญในการดูดซับโลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (A)

2. แบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria)

ผนังเซลล์ประกอบด้วยชั้นบางๆ ของเปปติโดไกลแคน และลิพอโปรตีน (Lipoprotein) ซึ่งประกอบด้วย Eubacterial lipid lipopolysaccharide และ ฟอสโฟลิปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (B)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรีย (A) แบคทีเรียแกรมบวก (B) แบคทีเรียแกรมลบ (Caldwell, 2000)

2.6.1 กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่มีชีวิต (Prasad, 2001)

กระบวนการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่มีชีวิตจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนแรก เป็นการดูดซับโลหะที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ (Metabolism independent accumulation) สามารถเกิดได้ทั้งเซลล์มีชีวิต เซลล์ตาย การดูดซับโลหะหนักในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่นาทีที่บริเวณผิวเซลล์โดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ที่บริเวณหมู่เคมีต่างๆ เช่น คาร์บอกซิล เอมีน ไฮดรอกซิล ฟอสเฟต ซัลไฟด์ รวมทั้งไคลดิน และกลูแคน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์ในรา โดยอาจมีกระบวนการอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น การตกตะกอนด้วยสารอนินทรีย์ (Inorganic precipitation) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น

ขั้นตอนที่สอง เป็นการสะสมโลหะที่อาศัยพลังงานจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ (Metabolism dependent accumulation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ช้ากว่าขั้นตอนแรก เพราะมักถูกยับยั้งเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ การขาดแคลนแหล่งพลังงานสำหรับกระบวนการเมแทบอลิซึม อัตราการนำโลหะเข้าสู่เซลล์เป็นผลมาจากสภาพทางกายภาพของเซลล์ องค์ประกอบของสารอาหาร โลหะที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต จากการศึกษากิจการของ Crist et al. (1992) พบว่าสาหร่ายทะเลมีการดูดซับโลหะหนักในขั้นตอนแรก ที่บริเวณผิวเซลล์ภายในเวลาไม่ถึง 4 วินาที แล้วจึงมีการนำพาโลหะหนักเข้าไปในเซลล์อย่างช้าๆ ในขั้นตอนที่สองซึ่งใช้เวลานานกว่า 2 ชั่วโมง กระบวนการสะสมโลหะหนักในขั้นตอนนี้ได้แก่ การลำเลียงแบบใช้พลังงาน (Active transport) ซึ่งกระบวนการลำเลียงสารแบบนี้เป็นการลำเลียงสารแบบอาศัยตัวพาเฉพาะ โดยมีพลังงานมาเกี่ยวข้องเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อน โมเลกุลของสารถูกละลายจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างที่มีการลำเลียงสารจากข้างหนึ่งของเมมเบรนไปอีกข้างหนึ่ง การเคลื่อนที่ของสารถูกละลายที่ต้องอาศัยแรงขับจากภายนอก จะมีผลทำให้สารเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง การลำเลียงสารแบบนี้ ส่วนมากมีการนำเอาพลังงานจำนวนมากนี้มาจากกระบวนการเมแทบอลิซึม ซึ่งได้แก่พลังงานควบคุมจากกระบวนการหายใจหรือการหมัก แต่การนำเอาพลังงานควบคุมมาใช้ไม่ได้เกิดจากการนำเอาพลังงานควบคุมมาใช้โดยตรง แต่จะมีขั้นตอนมัธยันตร์ (Intermediate steps) อย่างมากมายที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านพลังงาน ปฏิกิริยา หรือกระบวนการที่ใช้พลังงานควบคุมเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารถูกละลาย โดยทั่วไปจะได้จากแหล่งพลังงานฟอสเฟต ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของกระบวนการเมแทบอลิซึม นอกจากนี้ Gadd และ White (1989) พบว่าการลำเลียงโลหะหนักที่ไม่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของยีสต์อาจอาศัยระบบการลำเลียงของโลหะชนิดอื่นที่คล้ายกัน เช่น Cd^{2+} ถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์โดยอาศัยกระบวนการลำเลียงของ Mn^{2+} อีกทั้งผลิตภัณฑ์บางชนิด ที่ขับออกจากเซลล์ เช่น กรดซิตริก กรดออกซาลิก และ H_2S สามารถจับกับโลหะแล้วเกิดเป็นตะกอน รวมถึงการกำจัดโลหะที่เป็นพิษโดยการนำไปเก็บไว้ที่แวคิวโอล (Vacuole) ซึ่งภายในแวคิวโอลของ *Saccharomyces cerevisiae* สายพันธุ์ที่ทนต่อ Co^{2+} พบว่ามี Co^{2+} เป็นสัดส่วนที่สูงกว่าสายพันธุ์ปกติ โดยการสะสมเกิดจากการจับตัวกับโปรตีนภายในแวคิวโอล รวมถึงหมู่ฟอสเฟตในแวคิวโอล ยังสามารถจับกับ Mn^{2+} และ Zn^{2+} ได้อีกด้วย

2.6.2 กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (Prasad, 2001)

กระบวนการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่ไม่มีชีวิตจะเกิดขึ้นเฉพาะขั้นตอนแรกเท่านั้น โดยแบคทีเรียที่ไม่มีชีวิตสามารถดูดซับโลหะหนักได้ด้วยหมู่เคมีต่างๆ ที่บริเวณผนังเซลล์ จากงานวิจัยของ Beveridge (1989) พบว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก เช่น *Bacillus subtilis* ประกอบด้วยกลุ่มสายใยเปปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ในช่องว่างของกลุ่มเปปทิโดไกลแคนจะมีกรดไทโคอิก และกรดไทคูโรนิก ซึ่งหมู่ฟอสโฟไดเอสเทอร์ ของกรดไทโคอิก และหมู่คาร์บอกซิลของไทคูโรนิก เป็นส่วนที่สามารถจับโลหะหนักได้ ส่วนผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ ประกอบด้วยกลุ่มเปปทิโดไกลแคนบางๆ ซึ่งมีลิพอพอลิแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharide) เป็นชั้นเมมเบรนอยู่ด้านนอก หมู่ฟอสฟอริลของสายลิพอพอลิแซ็กคาไรด์สามารถจับโลหะหนักได้ แต่สำหรับ *E. coli* แล้วโลหะจับกับหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate group) ของเปปทิโดไกลแคนได้ดีกว่าเมมเบรนชั้นนอก

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของไคโตซาน

ไคโตซานมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ประจุบวก ซึ่งมีหมู่อะมิโน (NH_2) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี โดย Wu et al. (1999) อธิบายถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไคโตซาน ดังสมการ (2.9)



หมู่อะมิโนบนไคโตซาน มีสมบัติเป็นด่างอ่อน มีอิเล็กตรอนคู่ว่าง (Unshared pair of electron) อยู่ในรูปไม่มีประจุ (Unprotonated, NH_2) จึงสามารถสร้างพันธะกับโปรตรอน และสามารถสร้างพันธะกับโลหะแทรนซิชันหมู่ III ได้ดีกว่าโลหะหมู่ I และ II ซึ่งสอดคล้องกับ Rorrer (1995) ได้ อธิบายถึงไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) สร้างพันธะกับหมู่อะมิโนบนสายไคโตซานได้ เนื่องจากโลหะแทรนซิชันของ Cd^{2+} มี s,p และ Unsaturated d electron orbital ใน Outer shell ดังนั้นจึงเกิดการกิลชัน (Chelation) ใน d electron orbital ที่ยังว่างอยู่กับ p orbital ในหมู่อะมิโนของไคโตซาน ในขณะที่หมู่ I เช่น โซเดียม (Na^+) มี Electron orbital configuration เฉพาะ s และ p electron orbital ใน Outer shell

Lasko (1999) อธิบายว่าหมู่อะมิโนบนกลูโคซามีน (Glucosamine) เป็นบริเวณที่เกิดการสร้างพันธะกับเงิน (Ag^+) และไอออนของโลหะอื่นๆ โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งที่พีเอช

เป็นค่าหมู่อะมิโนจะอยู่ในรูปไม่มีประจุ และมีอิเล็กตรอนอิสระของไนโตรเจนที่อยู่ในหมู่อะมิโน จึงทำให้สามารถสร้างพันธะกับไอออนของเงินได้

Bassi et al. (2000) อธิบายการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะกับไคโตซานว่ามีความสัมพันธ์กับระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization) การกำจัดหมู่แอสีติล (Deacetylation) และการกระจายตัวของหมู่แอสีติลอิสระบนสายพอลิเมอร์ของไคโตซาน เหตุผลที่สนับสนุนแนวความคิดนี้เป็นเพราะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไคโตซาน และไอออนโลหะจะเพิ่มขึ้น หากมีการเพิ่มหมู่อะมิโนเข้าไปในสายพอลิเมอร์ของไคโตซานเป็นจำนวนมากๆ และพบว่าหมู่อะมิโนบนไคโตซานเป็นบริเวณที่เกิดโคออร์ดิเนชัน (Coordination) กับไอออนของโลหะ เนื่องจากมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Lone pair electron) ที่ตำแหน่งไนโตรเจน นอกจากนี้หมู่อะมิโนยังสามารถสร้างพันธะร่วมกับไอออนโลหะแทรนซิชันชนิดอื่นๆ ได้ เช่น สังกะสี (Zn^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) เป็นต้น

2.7.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียในงานวิจัยต่างๆ ได้นำไคโตซาน และอนุพันธ์ของไคโตซานมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น แคดเมียม ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และปรอท มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น ทั้งยังสามารถดูดซับวานาเดียม นิกเกิล (Bassi et al., 2000) นอกจากนี้ไคโตซานยังใช้เป็นตัวดูดซับในการแยกสารกัมมันตรังสีจากน้ำเสีย ดักจับยูเรเนียม และ โมลิบดีนัม (Guibal et al., 1999)

เกษม (2543) ศึกษาประสิทธิภาพของไคโตซานซึ่งสกัดมาจากเปลือกกุ้ง กระจง และ กุ้งผสมปู ในการกำจัดไอออน Pb^{2+} และ Hg^{2+} ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากห้องปฏิบัติการ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Pb^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.5 ใช้ปริมาณไคโตซาน 1.7 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 90.3 และสภาวะที่ใช้ในการกำจัด Hg^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.0 ใช้ปริมาณไคโตซาน 2.2 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 97.8 สำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Pb^{2+} และ Hg^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.5 โดยใช้ปริมาณไคโตซาน 1.5 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 66.4-67.6 และ 48.0-76.7 ตามลำดับ

อรุณี (2534) แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับของโลหะ โดยไคติน และ ไคโตซานที่ผลิตได้ พบว่า ไอออนโลหะ Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} ถูกดูดซับโดยไคตินได้เท่ากับ 7.0×10^{-3} , 3.4×10^{-3} , 0.01-0.07 และ 0.01-0.07 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ และโดยไคโตซานได้เท่ากับ 7.0×10^{-3} , 6.0×10^{-3} , 0.01-0.07 และ 0.01-0.07 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ สามารถลดปริมาณโลหะ Pb^{2+} ในแหล่งน้ำทิ้งบริเวณใกล้โรงงานอุตสาหกรรมจากความเข้มข้น 2.17×10^{-3} และ 1.3×10^{-3} มิลลิโมล/ลิตร ให้เหลือ 1.06×10^{-3} และ 0.53×10^{-3} มิลลิโมล/ลิตร

Bassi et al. (1999) ได้ศึกษาความสามารถของไคโตซานในการจับโลหะหนักที่ถูกชะออกมาในกระบวนการล้างดินด้วยกรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งจะได้ไอออนโลหะหนักหลายๆ ชนิดผสมกัน ได้แก่ Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ไคโตซาน 0.5 กรัม ใส่ในน้ำชะปริมาณ 25 มิลลิลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 6 อัตราเร็วของการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้ผลในการดูดซับไอออนโลหะหนักผสมที่ดี โดยมีการดูดซับ Zn^{2+} มากที่สุดคือร้อยละ 75 รองลงมาคือ Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} โดยมีการดูดซับ เท่ากับร้อยละ 71.55, 60 และ 40 ตามลำดับ ที่อัตราเร็วของการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาทีนั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก และการดูดซับไอออนโลหะหนักในสารละลายผสมจะเกิดขึ้นได้มากกว่าในสารละลายของไอออนโลหะหนักชนิดเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าความแรงไอออน (Ionic strength) ที่สูงกว่า แต่ Yang and Zall (1984) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก คือ โครเมียม ทองแดง แคลเดียม ตะกั่ว และ สังกะสี ด้วยพอลิเมอร์ 5 ชนิดที่ได้มาจากของเหลือทิ้งในกระบวนการแปรรูปอาหารทะเล ได้แก่ chitin, chitosan, porgy, flounder และ cod ขนาด 0.315 มิลลิเมตร ปริมาณ 0.5 กรัม ภายใต้สภาวะค่าพีเอชเท่ากับ 6 จะมีประสิทธิภาพลดลง เมื่อทำการทดลองภายใต้ระบบสารละลายผสม (Multi-solute system) เมื่อเทียบกับสภาวะระบบสารละลายเดี่ยว (Single-solute system) ส่วนการศึกษาการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด พบว่าไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดได้มากกว่า พอลิเมอร์อื่นๆ และมีการดูดซับทองแดงได้มากที่สุด (ร้อยละ 70.5) รองลงมา คือ โครเมียม (ร้อยละ 53.4) โดยมีค่าใกล้เคียงกับ แคลเดียมคือ ร้อยละ 54.3 และการดูดซับตะกั่ว และ สังกะสี จะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุด คือร้อยละ 40.3 และ 20.0 ตามลำดับ ส่วนพอลิเมอร์อีก 4 ชนิดมีแนวโน้มการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดไปในทางเดียวกันกับไคโตซาน นอกจากนี้ การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ พบว่าอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และมีขั้นตอนการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา

Bassi et al. (2000) ศึกษาความเป็นไปได้ของเกลือไคโตซานในการดูดซับโลหะหนัก เช่น สังกะสี ทองแดง แคลเดียม และตะกั่วในสารละลายที่สภาวะต่างๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็น

ถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยสามารถดูดซับทองแดงได้ร้อยละ 95 ตะกั่วได้ร้อยละ 84 แคดเมียมร้อยละ 48 และสังกะสีร้อยละ 44 ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ที่ 6.0 และ 7.0

Covas (1992) ศึกษาสมมูลของการดูดซับ Hg^{2+} ด้วยไคโตซาน พบว่าไคโตซานขนาด 1.25-2.5 มิลลิเมตร ปริมาณ 0.2 กรัม ที่มีการกวนอย่างต่อเนื่อง ให้การดูดซับ Hg^{2+} เกิดขึ้นมากที่สุดคือ ประมาณร้อยละ 79 และสมมูลของการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อกวนเป็นเวลานานประมาณ 100 นาที และพบว่า การกวนจะต้องมากพอที่จะทำให้ขั้นตอนกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือขั้นตอนการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) ได้ความเข้มข้นของ Hg^{2+} ที่ออกมาหลังจากจุด Breakthrough curve มีค่าต่ำกว่า 20 ไมโครกรัม/ลิตร

Deans (1992) ทำการศึกษาการกำจัดไอออน Pb^{2+} และ Cu^{2+} ด้วยไบโอพอลิเมอร์ ได้แก่ cellulose, alginic acid, chitin, chitosan, carrageenan, carboxymethyl, hydroxamic acid, อนุพันธ์ของ hydroxamic acid, terephthalic acid และ Chelex 20™ (Bio-Rad) โดยใช้ไบโอพอลิเมอร์ 0.015 กรัม บั่นเหวี่ยงกับสารละลาย Pb^{2+} และ Cu^{2+} ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 10, และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 10 นาที อัตราเร็วของการผสมเท่ากับ 10,000 รอบต่อนาที พบว่า ที่ความเข้มข้นของ Cu^{2+} เท่ากับ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานสามารถลด Cu^{2+} ได้มากที่สุด (ร้อยละ 99.89) ในขณะที่ ความเข้มข้นเท่ากับ 10 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานสามารถลดได้ร้อยละ 91.14 และ 58.55 ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นของ Pb^{2+} เท่ากับ 1, 10 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานสามารถลด Pb^{2+} ประมาณร้อยละ 35.41, 82.98 และ 37.5 ตามลำดับ

Nyein (1998) ศึกษาถึงผลกระทบของค่าพีเอช ขนาดของอนุภาค อุณหภูมิ อัตราเร็วในการกวน โดยพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักบนไคโตซานคือ 5.5, 6 และ 4 สำหรับ Cu^{2+} , Cr^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ ขนาดของอนุภาคไคโตซานเท่ากับ 710 และ 425 ไมโครเมตร สามารถดูดซับ Cu^{2+} ได้ 2 และ 7 มิลลิกรัม/กรัม จากสารละลายความเข้มข้นสมมูล 1 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ความเข้มข้นสมมูล 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถดูดซับ Cu^{2+} ได้ 6.5 และ 11 มิลลิกรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 37.5 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สารละลายความเข้มข้นสมมูลของ Cu^{2+} 5 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อทำการกวนที่ 50 และ 250 รอบต่อนาที ปริมาณ Cu^{2+} ที่ถูกดูดซับไว้เท่ากับ 16 และ 11 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ และแนวโน้มของ Cr^{2+} กับ Pb^{2+} เป็นไปในทำนองเดียวกัน โดยขนาดอนุภาคที่เล็กลง อุณหภูมิที่สูงขึ้น และความเร็วในการกวนที่สูงขึ้นทำให้การดูดซับดีขึ้น

2.7.3 การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักในตะกอนไคโตซาน

การชะโลหะหนักออกจากตะกอนไคโตซานสามารถชะออกได้ด้วยสารละลายในสภาพที่เป็นกรด สารละลายกรดเจือจางของ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สามารถชะโลหะหนักจากแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดมากกว่า 1 โมลาร์ จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านั้นถูกทำลาย และโลหะหนักภายในเซลล์จะถูกดึงออกมาด้วย (Gadd, 1990) การชะโลหะหนักออกจากวัสดุชีวมวล สรุปไว้ในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การชะโลหะหนักออกจากวัสดุชีวมวลด้วยสารละลายต่างๆ (Luef et al. (1991) Mattuschka (1993), Holan et al. (1993), Reed et al. (1995) และ Kuyucak (1989))

Reagent	Metals	Biomass type	Reference
0.1 M HCl	Zn	<i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Claviceps paspali</i>	Luef et al., 1991
0.01-10.0 M HCl	Cu, Pb	<i>Streptomyces noursei</i>	Mattuschka & Straube, 1993
0.025-0.5 M HCl	Cd	<i>Ascophyllum nodosum</i>	Holan et al., 1993
0.1, 1.0 M HCl, HNO ₃	Pb	Activated carbon	Reed et al., 1995
HCl, H ₂ SO ₄ , CaCl ₂ /HCl	Co	<i>Ascophyllum nodosum</i>	Kuyucak & Volesky, 1989

Mattuschka (1993) ทำการเปรียบเทียบการชะโลหะทองแดง ตะกั่ว ด้วยสารละลายกรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ และสารเคมีอื่นๆ ได้แก่ กรดแอสซิติค กรดแลคติก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก อีดีทีเอ โซเดียมไบคาร์บอเนต และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสารละลายกรดทั้ง 4 ชนิด สามารถชะโลหะหนักออกจาก *Streptomyces noursei* ได้ประมาณร้อยละ 95 จึงทำการศึกษาต่อโดยนำกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นต่างๆ ระหว่าง 0.01-10.0 โมลาร์ มาชะโลหะหนักเนื่องจากมีราคาถูก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง ไม่มีผลทำให้เซลล์ถูกทำลาย และมีประสิทธิภาพในการชะโลหะหนักได้ดีกว่าร้อยละ 85

Reed et al. (1995) ศึกษาการชะตะกั่วออกจากถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบบรรจุด้วยกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ผลการทดลองพบว่า

กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ทั้งสองความเข้มข้นสามารถชะตะกั่วได้ดีประมาณร้อยละ 69 ถึง 82 ดังนั้นกรดไฮโดรคลอริก จึงน่าสนใจกว่ากรดไนตริกเนื่องจากมีราคาไม่แพง และกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ยังคงสามารถชะตะกั่วได้ดีแม้จะนำกลับมาใช้ใหม่ในรอบที่ 4

Holan et al. (1993) ศึกษาการชะแคลเซียมออกจาก *Ascophyllum nodosum* ที่ถูกตรึงด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ และ กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.025, 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.5 โมลาร์ พบว่าสามารถชะแคลเซียมออกได้ร้อยละ 76.3, 81.4, 87.5, 94.5 และ 95.9 ตามลำดับ

Kuyucak (1989) ทำการเปรียบเทียบการชะ โลหะหนักโคบอลต์ด้วยกรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ อีดีทีเอ โพแทสเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์ผสมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ พีเอชเท่ากับ 2.5 สามารถชะโคบอลต์ออกจาก *Ascophyllum nodosum* ได้มากกว่าร้อยละ 96 และ วัสดุชีวมวลยังคงมีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำมาดูดซับโคบอลต์ใหม่อีกครั้ง

Poonpolwatanapron (2000) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักจากตะกอนน้ำเสียด้วยไคโตซาน พบว่า ไคโตซานสามารถลดปริมาณ ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และ สังกะสีในตะกอนน้ำเสีย โดยใช้ไคโตซานต่อตะกอนน้ำเสียในอัตราส่วน 1:100 ปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อหมักไว้ 2 สัปดาห์ โดยสามารถลดนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ได้ร้อยละ 70, 70, 60 และ 30 ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 สารเคมีสำหรับเตรียมโคติน/โคโตซาน

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
3. ก๊าซไนโตรเจน (N₂ gas) ความเข้มข้นร้อยละ 99.5: PRAXAIR

3.1.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โลหะหนัก

1. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (AR grade): MERCK, Germany
2. สารละลายมาตรฐานปรอท (AR grade): MERCK, Germany
3. สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (AR grade): MERCK, Germany
4. สารละลายมาตรฐานโครเมียม (AR grade): MERCK, Germany

3.1.3 อื่นๆ

1. สารละลายตะกั่วไนเตรต (Pb(NO₃)₂) (AR grade): MERCK, Germany
2. สารละลายเมอคิวรีคลอไรด์ (HgCl₂) (AR grade): UNIVAR, USA
3. กรดแอสติก (CH₃COOH) ความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก (AR grade): BDH, Germany
4. กรดไนตริก (HNO₃) ความเข้มข้นร้อยละ 69 โดยน้ำหนัก (AR grade): BDH, Germany

3.1.4 อาหารเพาะเลี้ยงเชื้อ

1. อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวนิวเทรียน (Nutrient broth)
2. พงวุ้น (Agar)
3. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนัก

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการเตรียมโคคิน/โคโตซาน

1. เตาอบ (Hot air oven): BINDER รุ่น ED115
2. แผ่นร้อนพร้อมเครื่องคนแบบแม่เหล็ก (Hot plate and Magnetic stirrer): PNP รุ่น HS-2
3. ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ และใบกวนเทปลอน: IKLABOR TECHNIK รุ่น RW 20n
4. เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle): FALC รุ่น MF-1000
5. เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบ 5 คอ (Reactor) ขนาด 2000 มิลลิลิตร
6. เทอร์มอมิเตอร์ (Thermometer) ช่วงอุณหภูมิ 0-100 และ 0-200 องศาเซลเซียส
7. เครื่องอ่างน้ำ (Water bath): Scientific Promotion รุ่น Dh30-110
8. เครื่องชั่ง (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
9. โถดูดความชื้น (Desicator): SANPLATEC รุ่น C-3W No.0031
10. เครื่องสูบลูญากาศ (Vacuum pump): Welch รุ่น 8890
11. ขวดดูด และกรวยกรอง (Suction flask และ Buchner funnel): Edwards รุ่น RV3
12. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 20 และ 24 mesh
13. เครื่องแก้วอื่นๆในห้องปฏิบัติการ

3.2.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการหาสถานะการดูดซับโลหะหนัก

1. Atomic Absorption Spectrophotometer/Flame type (AAS/Flame type): Shimadzu รุ่น AA-6800
2. Hydride Vapour Generator (HVG): Shimadzu
3. UV/VIS Spectrophotometer: Jasco รุ่น V-530
4. อุปกรณ์จาร์เทส (Jar test): VELP รุ่น JLT 6
5. มาตรฐานความเป็นกรด-เบส (pH meter): HANNA instruments รุ่น pH 211

3.2.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการศึกษาเรื่องจุลินทรีย์

1. เครื่องเขย่า (Shaker): Newbrunswick Scientific รุ่น Inova-2100

2. ตู้อบ (Incubator): Memmert รุ่น UE 200
3. ตู้เขี่ยเชื้อ (Larmina flow): Labservice Limited

3.3 วิธีการทดลอง

การวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเตรียมและลักษณะสมบัติของเกล็ดไคโตซาน

ส่วนที่ 2 การศึกษาความสามารถของเกล็ดไคโตซานในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย และการศึกษากลไกการกำจัด

ส่วนที่ 3 การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก รวมทั้งคัดเลือกและระบุสายพันธุ์ เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนไคโตซาน

3.3.1 ส่วนที่ 1 การเตรียมและลักษณะสมบัติของเกล็ดไคโตซาน

1. การเตรียมเกล็ดไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

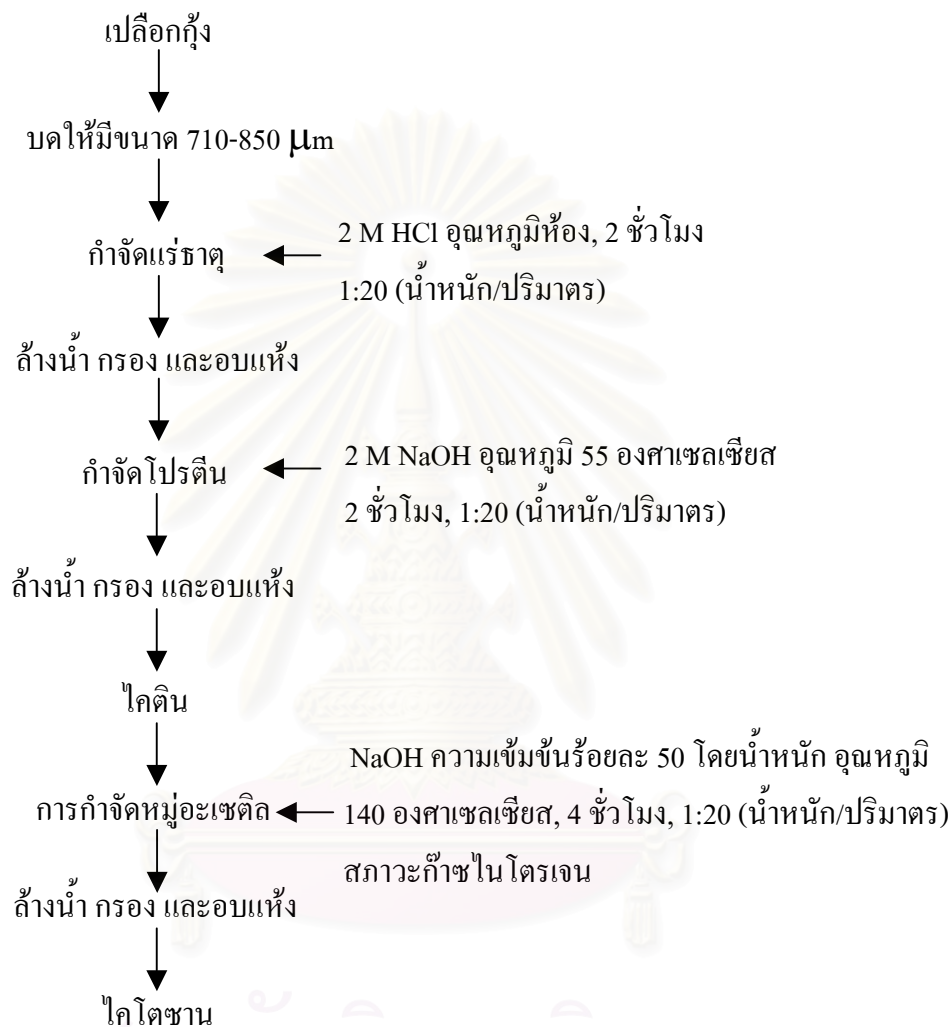
วิธีการเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้งในงานวิจัยนี้ ใช้สภาวะตามการศึกษาของ ยาวภา (2534) มีขั้นตอนประกอบด้วย การเตรียมไคติน โดยแบ่งออกเป็น การกำจัดโปรตีน การกำจัดแร่ธาตุ และการเตรียมไคโตซาน โดยการกำจัดหมู่อะเซทิล แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

(1) เปลือกกุ้ง ล้างน้ำให้สะอาดโดยแยกเอาส่วนเนื้อ ไขมัน และอื่นๆออก หลังจากนั้นนำไปอบแห้ง และบดให้มีขนาด 710-850 ไมโครเมตร (20-24 mesh)

(2) กำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนเปลือกกุ้งต่อปริมาณกรด (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 1:20 ล้างน้ำจนเป็นกลาง กรอง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง

(3) กำจัดโปรตีน (Deproteinization) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 55 ± 2 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนเปลือกกุ้งต่อปริมาณด่าง (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 1:20 ล้างน้ำจนเป็นกลาง กรอง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ไคติน

(4) กำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 ± 10 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน โดยใช้อัตราส่วนปริมาณไคตินต่อปริมาณต่างเป็น 1:20 ล้างน้ำจนเป็นกลาง กรอง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลึกภัณฑ์ที่ได้ คือ ไคโตซาน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

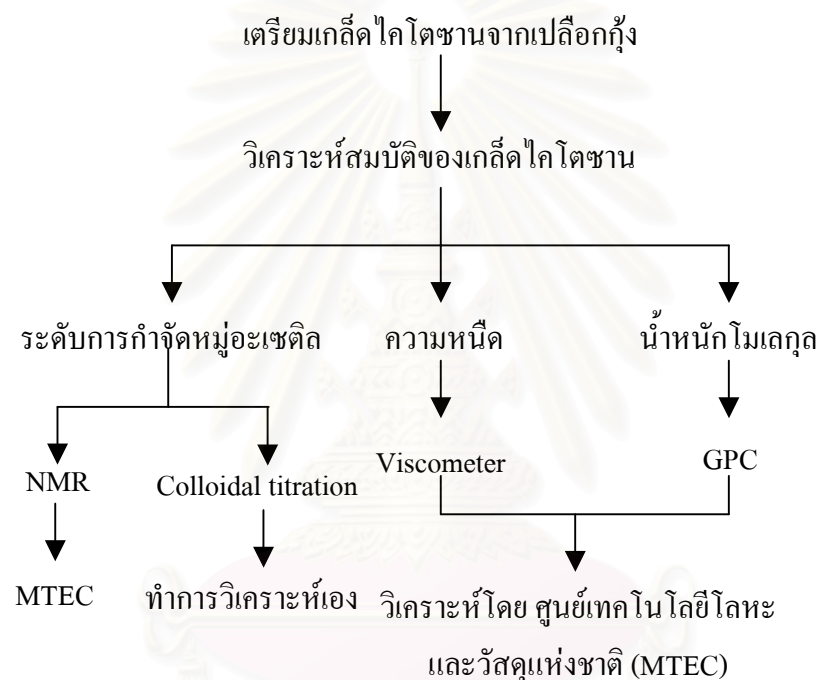
2. การวิเคราะห์สมบัติของเกล็ดไคโตซาน

(1) ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation) วิเคราะห์ทั้งทางเคมีโดยวิธี Colloidal titration (Amino residue analysis) (Hayes, 1988) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง NMR (Nuclear magnetic resonance)

(2) ความหนืด (Viscosity) ของสารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 1 ในกรดแอซีติกเข้มข้นร้อยละ 1 ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer โดยใช้ Spindle No.1 ความเร็ว 105 รอบ/นาที: วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

(3) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) โดยใช้เครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC): วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ส่วนที่ 1 สามารถสรุปขั้นตอน และวิธีการดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สรุปวิธีการทดลองในส่วนที่ 1 ของงานวิจัยนี้: การเตรียมและลักษณะสมบัติของเกล็ดไคโตซาน

3.3.2 ส่วนที่ 2 การศึกษาความสามารถของเกล็ดไคโตซานในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย และการศึกษากลไกการกำจัด

1. การศึกษาความสามารถของไคโตซานในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเครื่องจาร์เทส (Jar-test)

(1) ทดสอบสถานะในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ปริมาณเกล็ดไคโตซาน พีเอชของน้ำเสีย อัตราเร็วของการกวน และเวลาที่ใช้ในการกวน โดยการใช้การสำรวจเอกสาร หรืองานวิจัยที่

เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 3.1 ทดลองกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัด โลหะหนักเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของโลหะหนักแต่ละชนิด และทำการวิเคราะห์ทางสถิติ Analysis of Variance และ Duncan's New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เพื่อระบุค่าพีเอช และ อัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการกำจัดโลหะหนัก

พารามิเตอร์	สภาวะ*					
	1	2	3	4	5	6
1.อัตราส่วนปริมาณน้ำเสียจาก สถานกำจัดมูลฝอยฯ : เกล็ด ไคโตซาน (ปริมาตร/น้ำหนัก)	50:1	1000:1	40:1	235:1	181:1	266:1
2.pH	6	4	6	5.5	5	5.5
3.อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที)	150	250	500	กวน 120 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที กวน 40 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที ทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง		
4.เวลาในการกวน (ชั่วโมง)	12	24	10.5			

หมายเหตุ * สภาวะที่ 1 จาก Bassi et al. (1999)

สภาวะที่ 2 จาก Nyein (1998)

สภาวะที่ 3 จาก Yang (1984)

สภาวะที่ 4-6 จาก เกษม (2543)

(2) หาสภาวะที่เหมาะสมในรูปอัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ต่อ ปริมาณเกล็ดไคโตซาน และเวลาในการกวน โดยใช้ค่าพีเอช และอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมที่สุด ตามข้อ (1)

- นำน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ใสลงในบีกเกอร์
- ปรับพีเอชให้ได้ค่าตามสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในข้อ 1
- เติมเกล็ดไคโตซานปริมาณ 3.3, 5 และ 10 กรัมลงในบีกเกอร์แต่ละใบ
- กวนด้วยเครื่องจอร์เทสตามสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในข้อ 1
- วัดปริมาณ โลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ
- คำนวณปริมาณตะกั่ว และปรอทที่ถูกดูดซับต่อไคโตซาน 1 กรัม

(3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่กับเวลาที่ใช้ในการกวนเพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา โดยนำสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 2 มาทำการทดลอง และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้การทดลองทั้งในสถานะของน้ำเสียจริงจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ น้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม

(4) วิเคราะห์ค่าความสกปรกของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ ในรูป COD, BOD และ TSS หลังการตกตะกอนด้วยเกลือโคโคซานตามสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 2 ด้วยวิธีวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ข

(5) ศึกษาการเสริมฤทธิ์ (Synergism) และ การหักล้างฤทธิ์ (Antagonism) ของตะกั่ว และปรอท โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียวโดยใช้ $Pb(NO_3)_2$ หรือ $HgCl_2$ และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมให้ครอบคลุมกับปริมาณที่มีอยู่จริงในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ

2. การศึกษากลไกการกำจัดโลหะหนัก

(1) วิเคราะห์ระบบการดูดซับโลหะหนัก โดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบสมการการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich ดังนี้

- เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 กรัม/ลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

- ปรับสถานะน้ำเสียสังเคราะห์ และทดลองกับโคโคซานตามสถานะที่เหมาะสมจากข้อ (2) ในหัวข้อที่ 1

- วัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว
- ทำซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 และ 30 กรัม/ลิตร

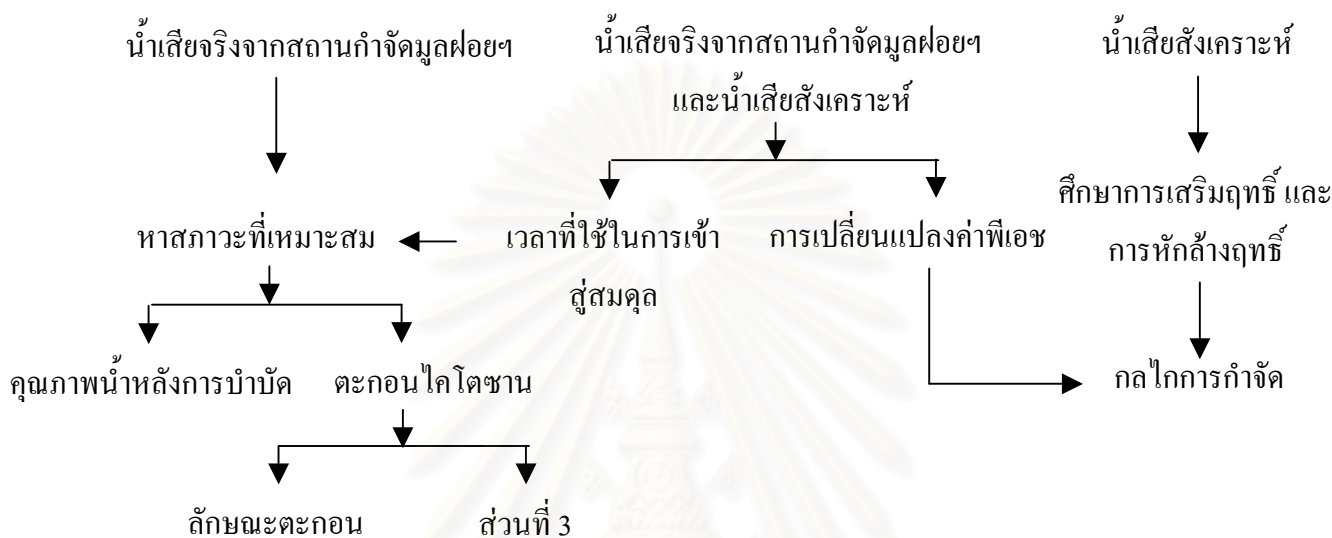
(2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียจากการบำบัดด้วยโคโคซาน

วัดค่าพีเอชของน้ำกลั่น (Blank) น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอทเมื่อกวนกับโคโคซาน เวลาต่างๆ

(3) ศึกษาลักษณะของโคโคซานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ทั้งก่อน และหลังใช้บำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยๆ: วิเคราะห์โดยศูนย์วัสดุชีวภาพโคโคซาน สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(4) วิเคราะห์ตะกอนไคโตซานด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR): วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ส่วนที่ 2 สามารถสรุปขั้นตอน และวิธีการดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สรุปวิธีการทดลองในส่วนที่ 2 ของงานวิจัยนี้: การศึกษาความสามารถของเกล็ดไคโตซานในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย และการศึกษากลไกการกำจัด

3.3.3 ส่วนที่ 3 การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียในตะกอนไคโตซาน

1. การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก

บ่มตะกอนไคโตซานที่ได้จากผลการทดลองกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ของตัวอย่างน้ำเสียวันที่ 30 เมษายน 2546 ณ ภาวะที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิ 37 และ 55 องศาเซลเซียส วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในตะกอนไคโตซานทุกสัปดาห์ เป็นเวลา 8 สัปดาห์ โดยย่อยตะกอนไคโตซานปริมาณ 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที โดยสภาวะนี้จะไม่ทำให้เกิดการแตกของผนังเซลล์จุลินทรีย์ (ธีรวิทย์, 2541) เมื่อกรอง และนำสารละลายส่วนในสัปดาห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer จะได้ปริมาณโลหะหนักที่เปลี่ยนรูปเข้าไปในเซลล์แบคทีเรียกับเวลาที่ใช้ในการบ่ม โดยปริมาณโลหะหนักในเซลล์แบคทีเรีย = ปริมาณโลหะหนักในตะกอนเริ่มต้น - ปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายกรด

2. การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียในตะกอนโคลิโดซาน

- เก็บตะกอนโคลิโดซานที่บ่ม ณ อุณหภูมิ 37 และ 55 องศาเซลเซียส ปริมาณ 5 กรัม (น้ำหนักเปียก) ใส่ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวชนิดทริเพปต์ (Nutrient broth: NB) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

- เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

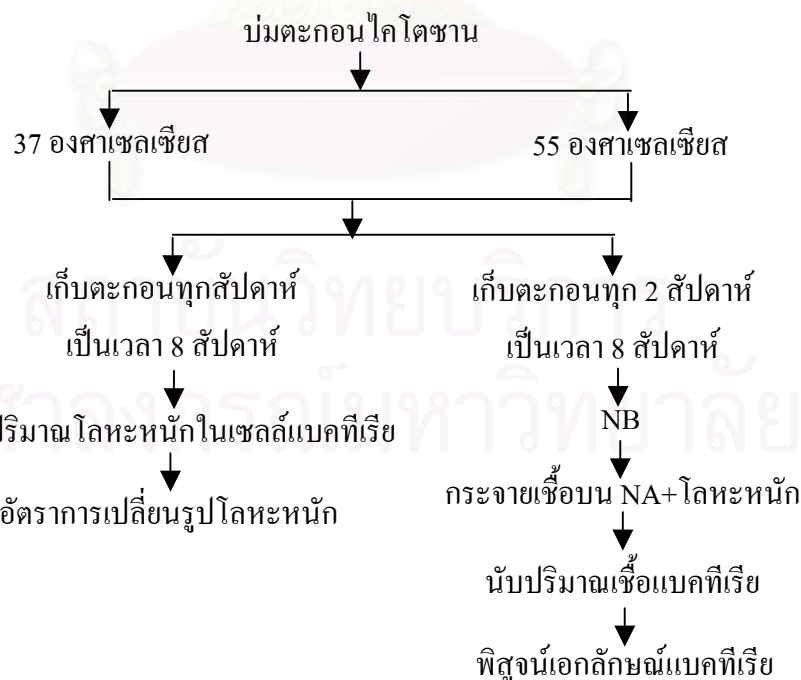
- นับปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (Plate count) ตามวิธีการกระจายเชื้อ (Spread plate) (สุราษฎร์ ภูอินทร์, 2540) โดยทำการเจือจาง (dilution) เชื้อแบคทีเรียให้เจือจางเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 เท่า เป็นลำดับ (Ten fold serial dilution) ซึ่งจะทำทั้งหมด 7 ลำดับ คือ $1:10$, $1:10^2$, $1:10^3$, $1:10^4$, $1:10^5$, $1:10^6$ และ $1:10^7$

- กระจายเชื้อ (Spread plate) ในระดับความเจือจาง $1:10^5$, $1:10^6$ และ $1:10^7$ บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง (Nutrient agar: NA) และอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งที่มีโลหะหนัก (ตะกั่ว หรือปรอท หรือทั้ง 2 ชนิด) ผสมอยู่ บ่มไว้ที่อุณหภูมิเดียวกับตะกอนที่เก็บมา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นับจำนวนโคโลนีแบคทีเรียด้วยตาเปล่า

- คัดเลือก และส่งแบคทีเรียเพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

ส่วนที่ 3 สามารถสรุปขั้นตอน และวิธีการดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สรุปวิธีการทดลองในส่วนที่ 3 ของงานวิจัยนี้: การศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์เชื้อแบคทีเรียในตะกอนโคลิโดซาน

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการเตรียมไคติน ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

4.1.1 ผลการสกัดไคโตซาน

เปลือกกุ้งอบแห้งปริมาณ 1,022.15 กรัม สามารถสกัดไคตินได้ 557.62 กรัม ปริมาณร้อยละของไคตินเทียบกับเปลือกกุ้งอบแห้งเท่ากับ 54.55 เมื่อนำไคตินปริมาณ 500.00 กรัม ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่อะเซทิลออกได้ไคโตซานปริมาณ 361.11 กรัม โดยปริมาณร้อยละไคโตซานเทียบกับไคติน เท่ากับ 72.22 เกล็ดไคติน และไคโตซานที่เตรียมได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 โดยลักษณะปรากฏทางสายตาที่แตกต่างกันคือ ไคตินมีสีเข้มกว่าไคโตซาน



H
0.7 mm

รูปที่ 4.1 ไคติน (บน) ไคโตซาน (ล่าง)

4.1.2 สมบัติของไคโตซาน

สมบัติของไคโตซานที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ มวลโมเลกุล ความหนืด และระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล ได้ผลคือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.8×10^5 คัดตัน ความหนืดมีค่าเท่ากับ 54.6 เซนติพอยส์ และระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.09 ดังตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบไคโตซานที่สกัดได้กับไคโตซานเชิงการค้าจัดเป็นไคโตซานชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ตารางที่ 4.1 สมบัติของไคโตซาน

สมบัติ	วิธีวิเคราะห์	หน่วย	งานวิจัยนี้	เอกสาร	ไคโตซานเชิงการค้า		
				อ้างอิง	(Aldrich 2003-2004)		
				เกษม (2544)	ชนิดน้ำ หนัก โมเลกุลสูง	ชนิดน้ำ หนัก โมเลกุล ปานกลาง	ชนิดน้ำ หนัก โมเลกุล ต่ำ
มวล โมเลกุลเฉลี่ย	GPC	คัตตัน	1.8×10^5 ^b	3.3×10^5	-	-	-
ความหนืด	Brookfield	เซนติพอยส์	54.6 ^{a, b}	30 ^a	800-2,000 ^a	200-800 ^a	20-200 ^a
ระดับการกำจัด หมู่อะเซทิล	Colloidal titration	%	90.09	-	-	75-85	75-85
	NMR		100 ^b	94	-	-	-

หมายเหตุ: ^a สารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 1 ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1

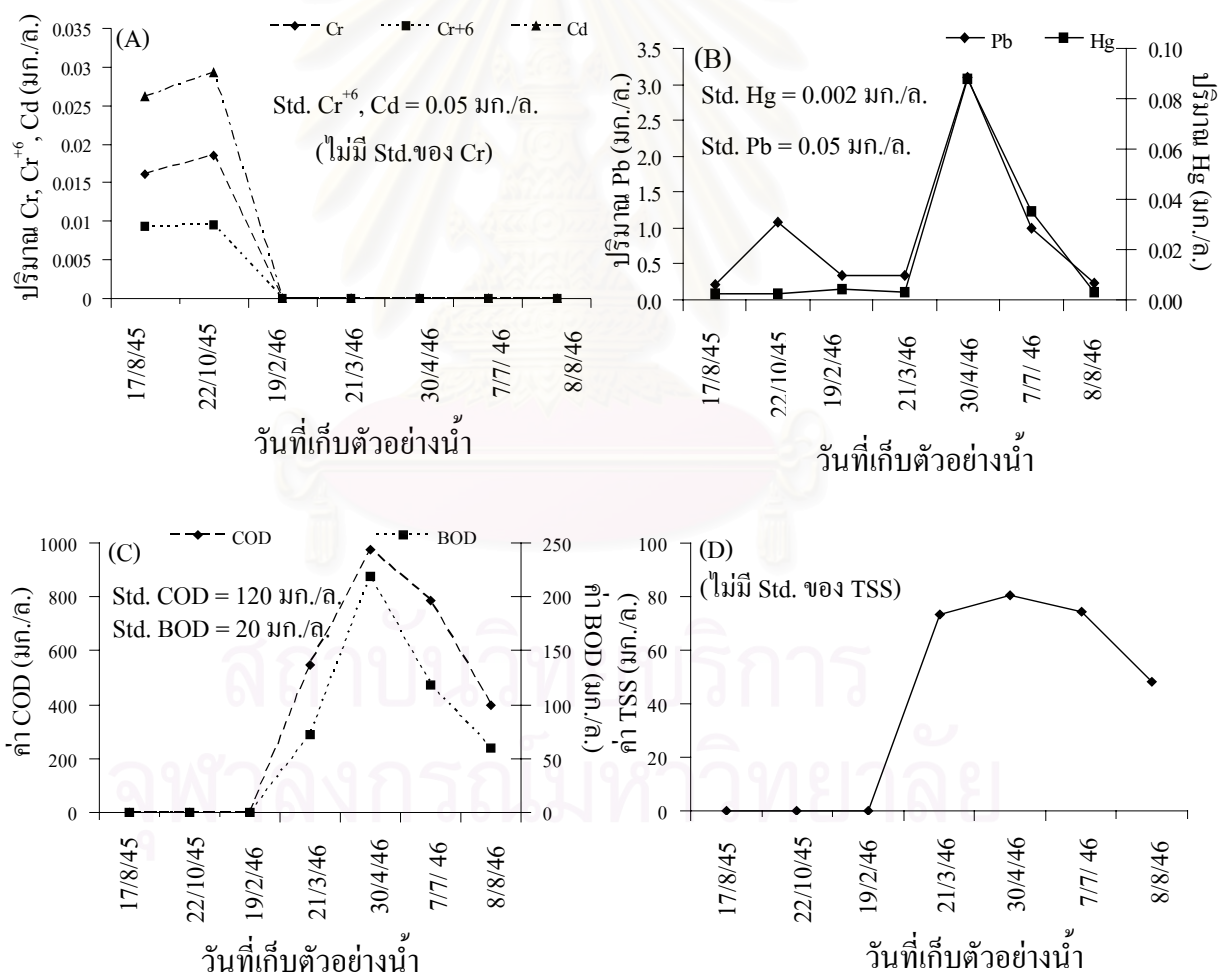
^b ผลการวิเคราะห์โดย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

4.2 สมบัติของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช

น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช เป็นน้ำฝนที่ตกชะผ่านกองขยะที่เทกองทิ้งกลางแจ้งน้ำจากการล้างรถขยะ น้ำเสียจากโรงบำบัดสิ่งปฏิกูล และน้ำเสียจากโรงงานเผาขยะ โดยเก็บน้ำเสีย ณ บ่อรับน้ำเสียรวม (Received pond) และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 พบว่ามีปริมาณตะกั่ว ปรอท และสารอินทรีย์ในรูป COD BOD เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน (ตารางที่ ค.1 ภาคผนวก ค) ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างน้ำ

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช

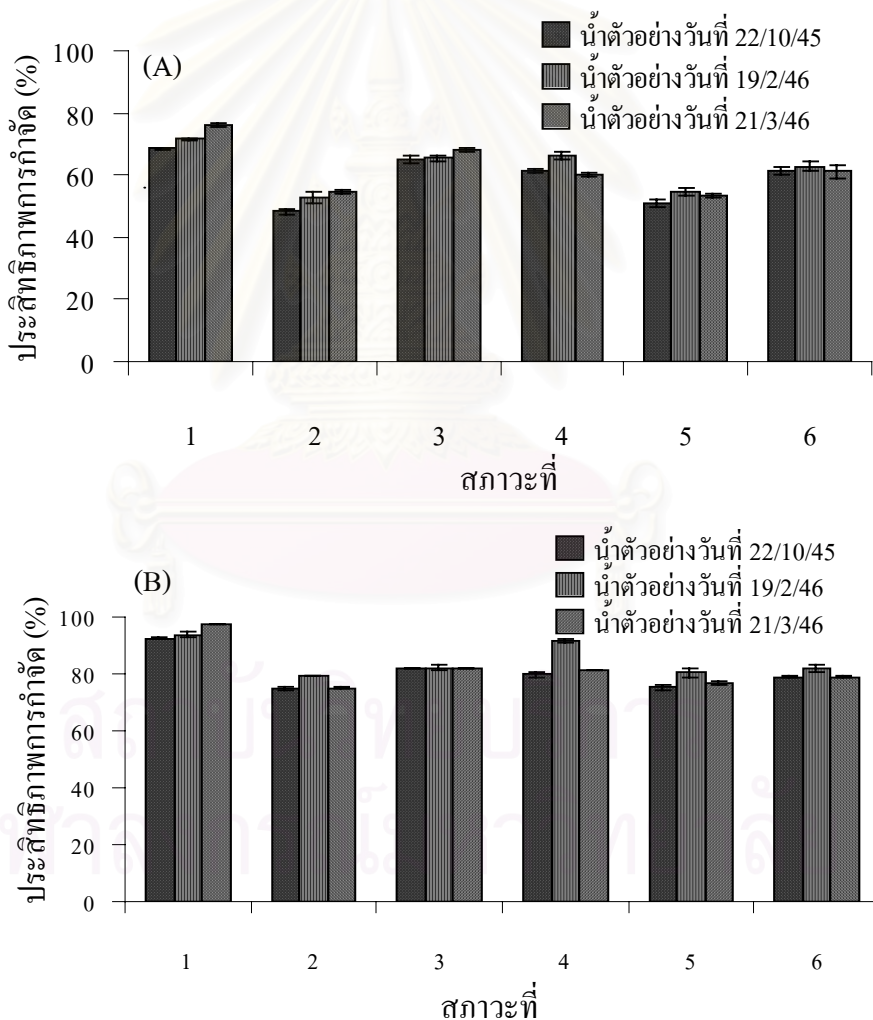
สมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{+6})	มก./ล	0.0093-0.0095
แคดเมียม (Cd)	"	0.0261-0.0293
ตะกั่ว (Pb)	"	0.2000-3.1000
ปรอท (Hg)	"	0.0027-0.0881
ซีโอดี (COD)	"	398.60-974.70
บีโอดี (BOD)	"	60.10-219.40
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	"	43.50-80.50
พีเอช (pH)	-	6.98-7.21



รูปที่ 4.2 คุณภาพน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช ณ วันที่เก็บตัวอย่าง
(A) ปริมาณ Cr, Cr⁺₆, Cd (B) ปริมาณ Pb, Hg (C) ค่า COD, BOD และ (D) ค่า TSS

4.3 ค่าพีเอช และอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดสอบการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ 3 ครั้ง ที่สภาวะต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 พบว่าสภาวะที่ 1 ซึ่งใช้โคโคซาน 5 กรัม ในน้ำเสีย 250 มิลลิลิตร ที่พีเอช 6 กวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และปรอท ได้ดีที่สุดใน ร้อยละ 68.44-75.90 และ 92.54-97.60 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 (A, B) และ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสองชนิด ณ สภาวะที่ 1 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับสภาวะอื่นๆ (ตารางที่ ก.4.3-ก.4.4 และ ก.4.6-ก.4.7 ภาคผนวก ก) ดังนั้นจึงเลือกปรับสภาวะพีเอชน้ำเสีย เท่ากับ 6 และกวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นสภาวะของการศึกษาในส่วนต่อไป

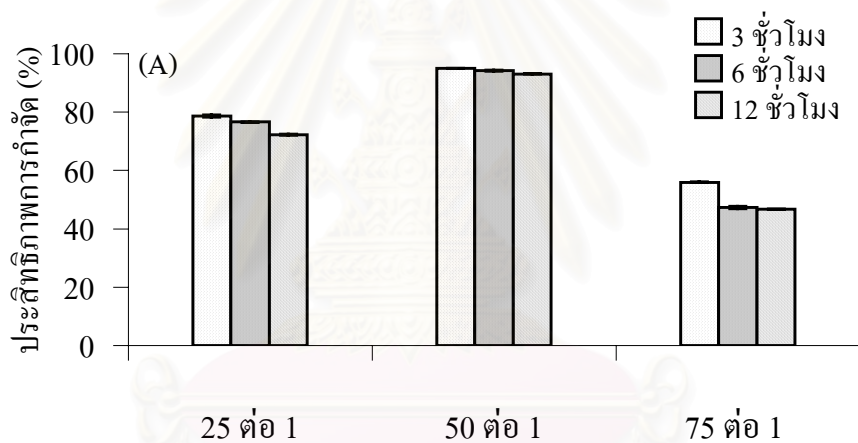


รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (A) และปรอท (B) ด้วยเกลือโคโคซาน ณ สภาวะต่างๆ

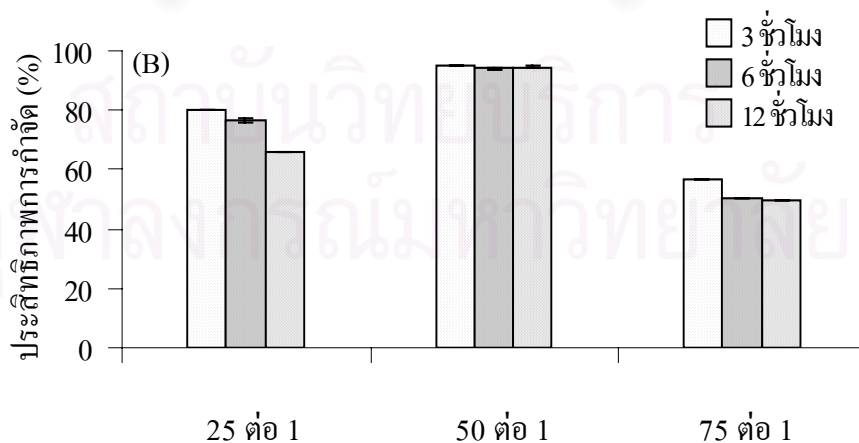
4.4 ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

จากการใช้น้ำเสียตัวอย่าง ณ วันที่ 30 เมษายน 2546 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ต่อปริมาณเกลือโคโคซาน และเวลาที่ใช้ในการกวน ตามรูปที่ 4.4 (A, B) พบว่าต้องใช้เกลือโคโคซาน 5 กรัมใส่น้ำเสีย 250 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โคโคซานสามารถดูดซับตะกั่ว และปรอทได้ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 94.95 ± 0.01 และ 95.27 ± 0.07 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน 75:1 หรือที่ 25:1 พบว่า การใช้โคโคซานในปริมาณที่น้อยเกินไปหรือมากเกินไปจะส่งผลให้การดูดซับโลหะหนักมีประสิทธิภาพลดลง ส่วนในกรณีของเวลาที่ใช้ในการกวน พบว่า เวลาในการกวน 3 ชั่วโมง นานเพียงพอที่กระบวนการดูดซับ ตะกั่ว และปรอทด้วยโคโคซานเข้าสู่ภาวะสมดุลดังแสดงในรูปที่ 4.5 จึงทำให้ผลของเวลาที่ใช้ในการกวนในรูปที่ 4.4 ไม่มีความแตกต่างมากนัก

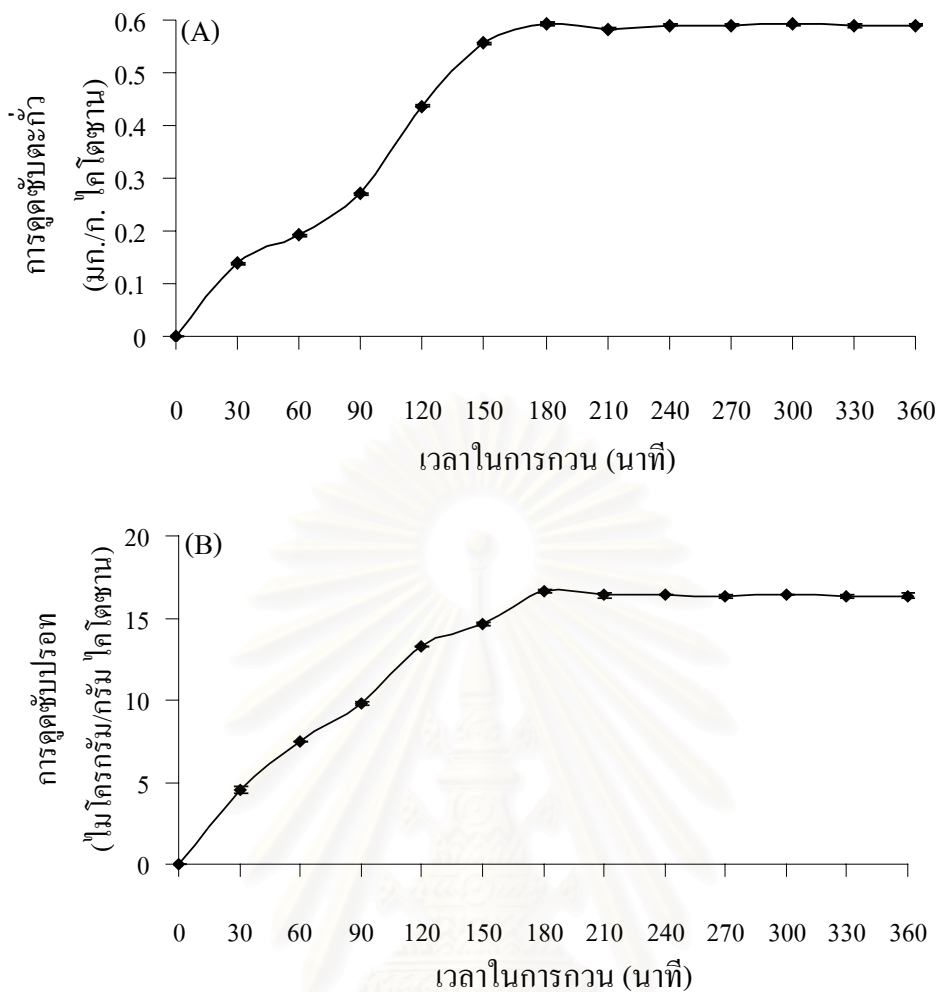


อัตราส่วนน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ต่อปริมาณเกลือโคโคซาน (มล/ก)



อัตราส่วนน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ต่อปริมาณเกลือโคโคซาน (มล/ก)

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ต่อปริมาณเกลือโคโคซานในการกำจัดตะกั่ว (A) และปรอท (B) ณ เวลาในการกวนต่างๆ



รูปที่ 4.5 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับตะกั่ว (A) และปรอท (B)

4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

รูปที่ 4.6 และ 4.7 ทางซ้ายมือ แสดงจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่ว และปรอททั้งในน้ำเสียจริง (A) น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักชนิดเดียว (B) และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักผสม (C) ตามลำดับ พบว่า การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นจะค่อยๆ คงที่ในเวลา 120-180 นาที แตกต่างตามประเภทของน้ำเสีย แสดงว่าอัตราการดูดซับในช่วงเริ่มต้นจะสูงกว่าอัตราการคาย เพราะ Active site ที่สามารถดูดซับตะกั่ว และปรอทยังมีอยู่มาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป Active site จะลดลง โดยในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 180 นาที โดยสามารถดูดซับตะกั่ว และปรอทได้ 0.51 มิลลิกรัม และ 14.50 ไมโครกรัมต่อโคโดซาน 1 กรัม ตามลำดับ ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว และปรอท การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 150 นาที สามารถดูดซับได้ 0.59 มิลลิกรัม และ 17.28 ไมโครกรัม ตามลำดับ และ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท โคโดซานที่เวลา 120 นาที สามารถดูดซับตะกั่วได้ 0.60 มิลลิกรัม และปรอท 17.40 ไมโครกรัม

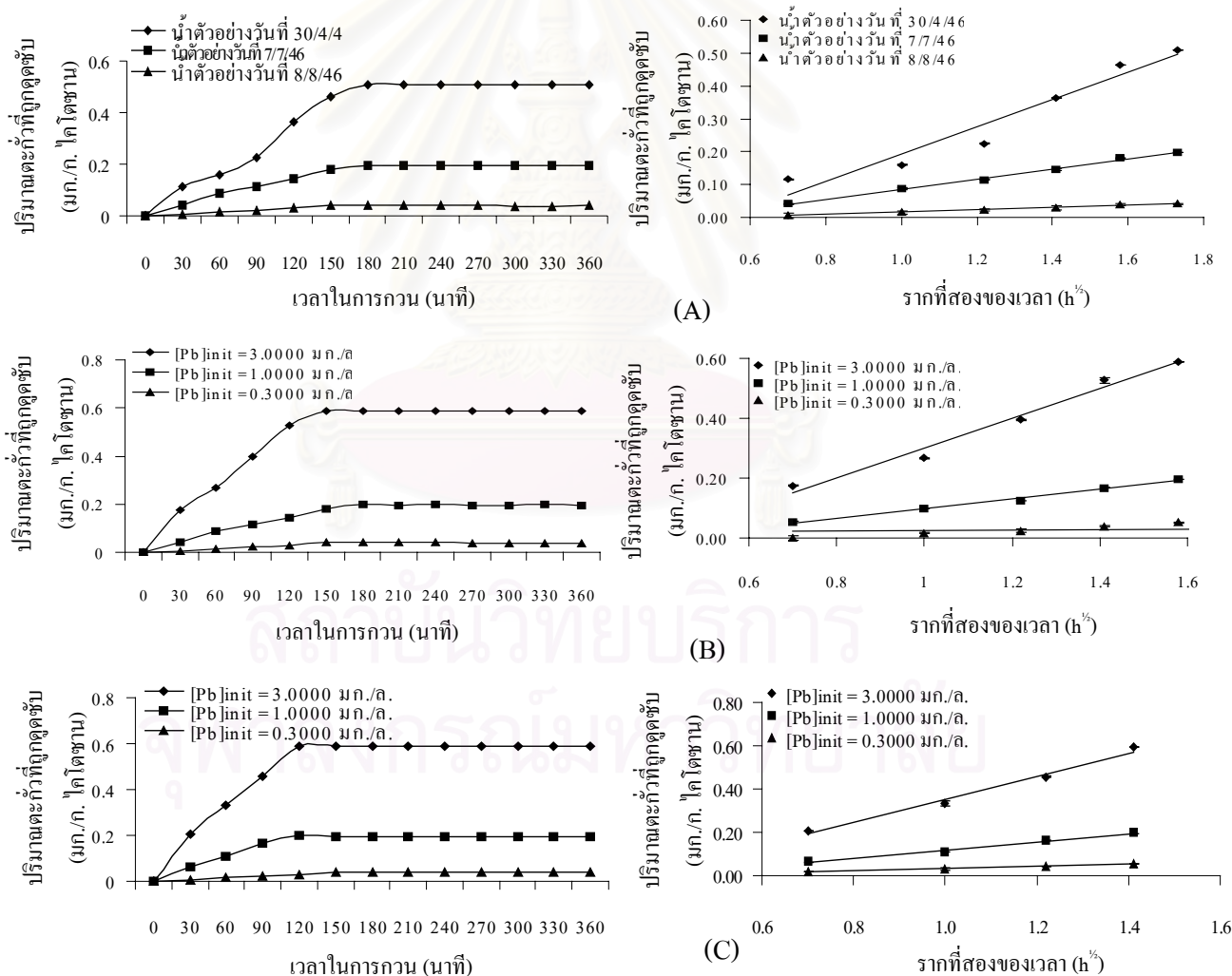
ตามลำดับ ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Covas et al. (1992) ที่พบว่าอัตราการดูดซับในช่วงแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึง 100 นาที หลังจากนั้น อัตราการดูดซับจะเริ่มคงที่ และ Yang et al. (1984) ก็พบว่า อัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นใน 2 ชั่วโมงแรกของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท รูปที่ 4.6 และ 4.7 ทางขวามือ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สองของเวลาที่ใช้ในการกวน กับปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ ซึ่งแทนได้ด้วยเส้นตรง แสดงว่า ขั้นตอน Intraparticle diffusion เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา

จากการคำนวณหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) ในขั้นตอน Intraparticle diffusion ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟระหว่างเวลาที่สองของเวลาที่ใช้ในการกวน ($t^{1/2}$) กับปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ สำหรับการดูดซับตะกั่ว และปรอทด้วยไคโตซานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว และปรอทต่างๆ กัน ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ค่า k_1 ของตะกั่วอยู่ในช่วง 0.0357-0.5355 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง^{1/2} และปรอท 0.4561-17.5810 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง^{1/2} โดยค่า k_1 เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า k_1 ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักชนิดเดียวสูงกว่าค่า k_1 ในน้ำเสียจริง และค่า k_1 ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมให้ค่าสูงกว่าค่า k_1 ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว แสดงว่า การมีตะกั่ว และปรอทอยู่ด้วยกันในน้ำเสียส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับบนไคโตซานมากขึ้น และเร็วขึ้น

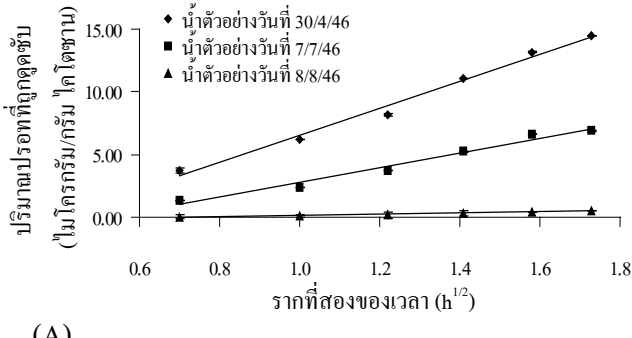
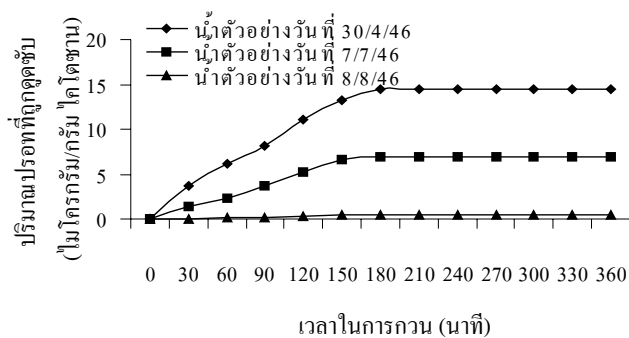
เมื่อเปรียบเทียบค่า k_1 กับงานวิจัยอื่นๆ โดยในการศึกษาของ Yang et al. (1984) ที่ใช้ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น 1×10^3 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานขนาด 0.315 มิลลิเมตร ค่า k_1 ที่คำนวณได้ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเท่ากับ 58.02 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง^{1/2} ส่วน Covas et al. (1992) ใช้ความเข้มข้นของปรอทเริ่มต้น 2.4×10^3 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานขนาด 1.25-2.5 มิลลิเมตร คำนวณค่า k_1 ในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทเท่ากับ 202.60 มิลลิกรัม/กรัม-ชั่วโมง^{1/2} พบว่า k_1 ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่ามาก เนื่องมาจากความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียที่ใช้ในการงานวิจัยอื่นๆ มีค่าสูงกว่าในงานวิจัยนี้มาก นอกจากนี้ยังเนื่องมาจากขนาดไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ต่างจากขนาดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ครอบคลุมความเข้มข้นที่มีอยู่ในน้ำเสียจริง ตามรูปที่ 4.8 แสดงอย่างชัดเจนว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสีย (ตารางที่ ก.8.1-ก.8.4 ในภาคผนวก ก) การมีตะกั่ว และปรอทอยู่ด้วยกันในน้ำเสีย ทำให้ปริมาณตะกั่ว และปรอทที่ถูกดูดซับโดยไคโตซานเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา โดยปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมในรูปที่ 4.8 (A) ชัดเจนกว่าปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 4.8 (B) แสดงว่าปรอทช่วยให้การดูดซับตะกั่วสูงขึ้น

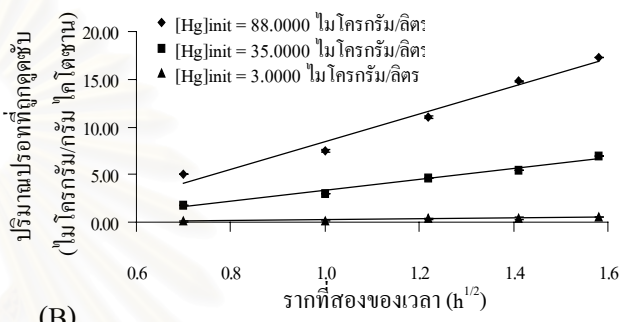
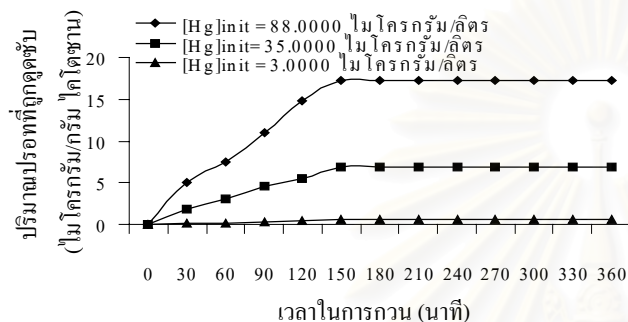
มากกว่าฤทธิ์ของตะกั่วที่มีผลต่อการดูดซับปรอทโดยไคโตซาน นอกจากนี้มีการเบี่ยงเบนของปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับในระบบน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมจากระบบน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียวมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามผลการเสริมฤทธิ์การดูดซับตะกั่ว และปรอทไม่สูงมากนัก อาจอธิบายได้ว่าเนื่องจากตะกั่ว และปรอท มีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electronegativity, EN) และมีรัศมีไอออนที่ใกล้เคียงกัน (ค่า EN ของตะกั่ว และปรอท เท่ากับ 1.9 ส่วนรัศมีไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) และปรอท (Hg^{2+}) เท่ากับ 1.20 \AA และ 1.10 \AA ตามลำดับ) (Kask and Rawn, 1993) ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมไนโตรเจนของหมู่อะมิโนเท่านั้น นอกจากนี้ผลของคลอไรด์ (Cl^-) และไนเตรต (NO_3^-) จากสารประกอบตะกั่ว และปรอทที่นำมาใช้ในการทดลองต่างมีค่าความแรงของเบส (Base strength) ที่ใกล้เคียงกัน (ตามตารางที่ ค.2 ภาคผนวก ค) นั่นคือความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่โลหะหนักเพื่อใช้จับกับหมู่อะมิโน ไม่มีผลมากนัก (อินทิรา, 2545)



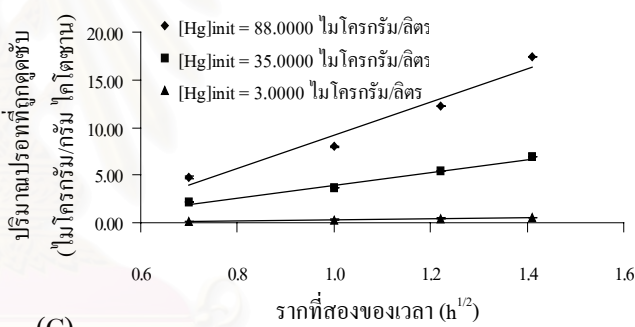
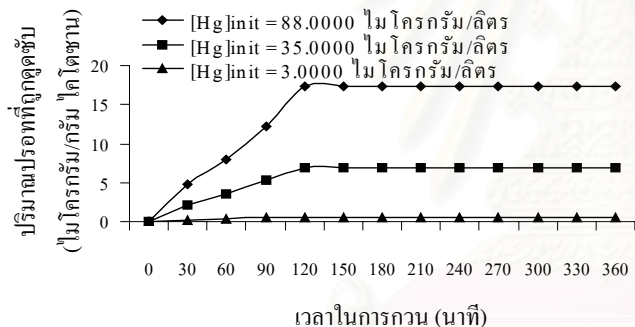
รูปที่ 4.6 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ (A) น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (B) และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท (C) ด้วยไคโตซาน



(A)

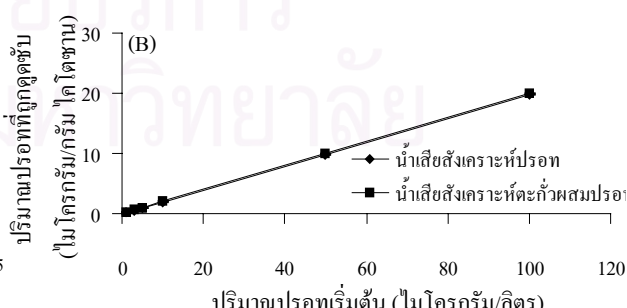
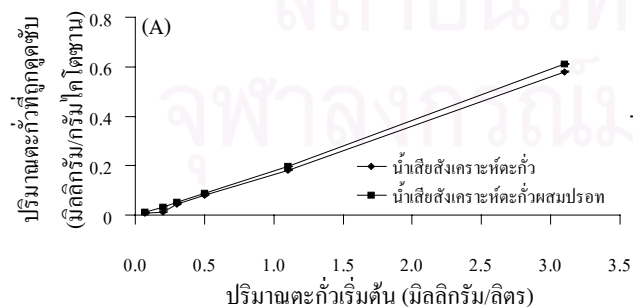


(B)



(C)

รูปที่ 4.7 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาในการกวนต่างๆ ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ (A) น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (B) และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท (C) ด้วยไคโตซาน



รูปที่ 4.8 ปริมาณตะกั่ว (A) และ ปรอท (B) ที่ถูกดูดซับด้วยไคโตซาน ณ ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.3 อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอน Intraparticle diffusion ในการดูดซับตะกั่ว และปรอทด้วยไคโตซาน

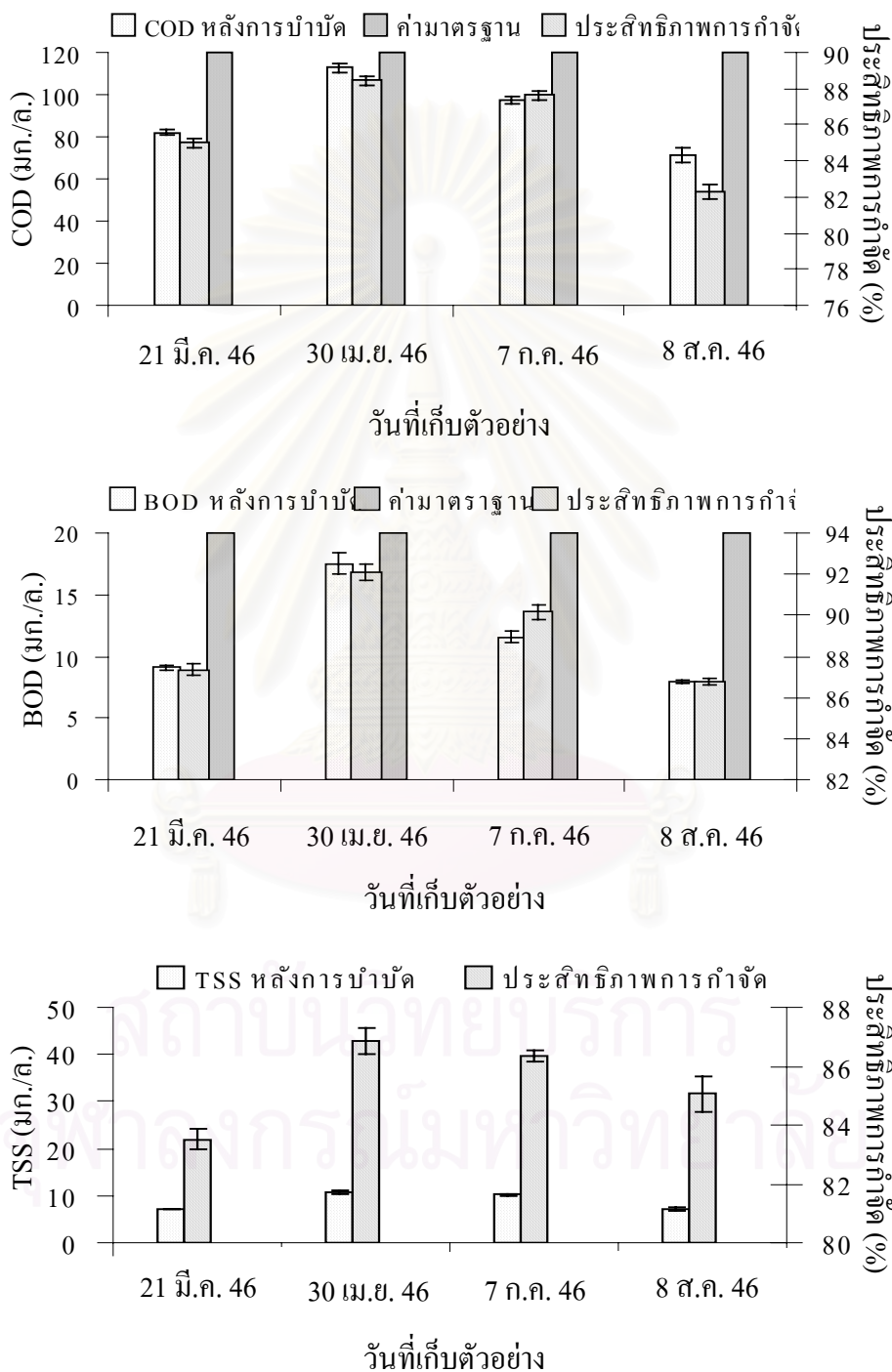
ประเภทของน้ำเสีย	ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ตะกั่ว			ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	ปรอท		
		k_1 ($\text{mg/g-h}^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2		k_1 ($\mu\text{g/g-h}^{1/2}$)	t_{lim} (min)	R^2
น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ	3.0992	0.4151	180	0.9414	88.1000	10.8140	180	0.9877
	1.0030	0.1535	180	0.9962	35.1000	5.8814	180	0.9759
	0.2347	0.0357	180	0.9824	2.9000	0.4561	180	0.9691
น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว	3.0000	0.4960	150	0.9799	-	-	-	-
	1.0000	0.1623	150	0.9882				
	0.3000	0.0502	150	0.9785				
น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท	-	-	-	-	88.0000	14.4500	150	0.9757
					35.0000	5.7460	150	0.9846
					3.0000	0.5210	150	0.9844
น้ำเสียสังเคราะห์ผสมปรอท	3.0000	0.5355	120	0.9849	88.0000	17.5810	120	0.9585
	1.0000	0.1931	120	0.9861	35.0000	6.7048	120	0.9829
	0.3000	0.0544	120	0.9730	3.0000	0.5676	120	0.9489

หมายเหตุ: t_{lim} = limit time for the rate determining step

4.6 ผลการศึกษาการลดค่า COD, BOD และ TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ หลังการตกตะกอนด้วยไคโตซาน

ผลการศึกษาการลดค่า COD, BOD และ TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเกลือไคโตซาน 5 กรัม ในน้ำเสีย 250 มิลลิลิตร ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.9 พบว่าไคโตซานสามารถลดค่า COD, BOD และ TSS ให้อยู่ในช่วง 70.59-112.70, 7.96-17.53 และ 7.17-10.58 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หรือ คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 82.29-88.44, 86.77-92.07 และ 83.52-86.86 ตามลำดับ โดยปริมาณ COD, BOD และ TSS ที่วิเคราะห์ได้หลังการบำบัดมีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน (ตารางที่ ก.1 ภาคผนวก ก)

การลดลงของสารอินทรีย์ และของแข็งแขวนลอย อธิบายได้ว่า ไคโตซานทำหน้าที่ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ เพราะไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประเภทหนึ่งที่มีประจุบวก และอนุภาคสารอินทรีย์มีประจุเป็นลบ ทำให้สารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพอยู่ในสภาพแขวนลอย ถูกทำลาย และจับตัวกันแน่นขึ้นจนตกตะกอนลงมาตามแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 4.9 การลดค่า COD, BOD และ TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

4.7 ผลการศึกษาทั่วโลกในการกำจัดโลหะหนัก

4.7.1 ผลการวิเคราะห์ระบบการดูดซับตะกั่ว และปรอท โดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษารูปแบบสมการการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir) และ ฟรุนดลิช (Freundlich)

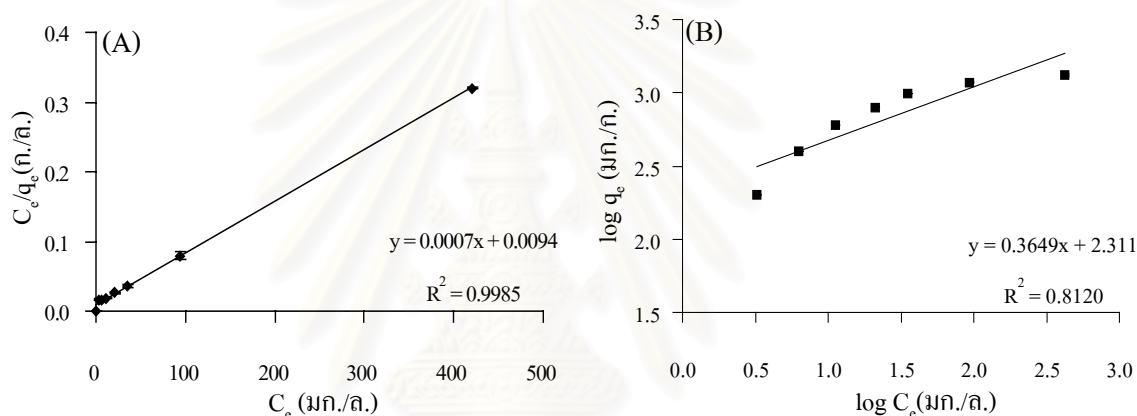
การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับตะกั่ว และปรอทด้วยไคโตซาน กับสมการแลงมัวร์ (สมการ (2.2)) และสมการฟรุนดลิช (สมการ (2.4)) ได้ผลตามรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ โดยสมการแลงมัวร์เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล (C_e) และอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลต่อปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (C_e/q_e) สำหรับสมการฟรุนดลิชเป็นกราฟความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm) ระหว่างความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในสารละลายในสภาวะสมดุล (C_e) และปริมาณของโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) จากรูปสามารถคำนวณปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับได้สูงสุด (X_m) และค่าคงที่ของการดูดซับ (b) ตามสมการแลงมัวร์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย (K) และค่า Correction factor (n) ตามสมการฟรุนดลิช ได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่าการดูดซับตะกั่ว และปรอทเข้ากันได้กับสมการแลงมัวร์ (R^2 ของตะกั่ว และปรอท เท่ากับ 0.9985 และ 0.9990 ตามลำดับ) มากกว่าสมการ ฟรุนดลิช (R^2 ของตะกั่ว และปรอท เท่ากับ 0.8120 และ 0.7928 ตามลำดับ)

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

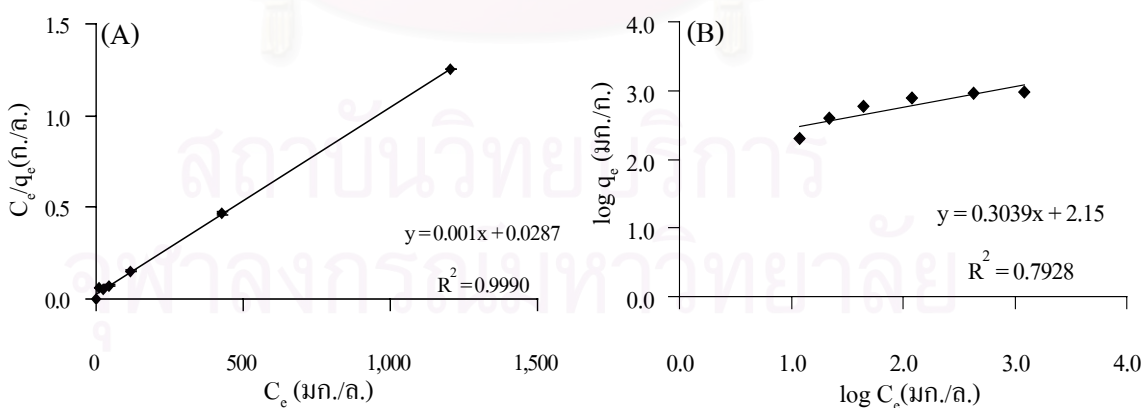
$$\log q_e = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาค่า X_m ในสมการของแลงมัวร์ พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่าปรอท (1.43×10^3 และ 1.00×10^3 มิลลิกรัม/กรัมไคโตซาน ตามลำดับ) และค่า b ซึ่งสัมพันธ์กับค่าพลังงานพันธะ (Bonding energy) พบว่า การดูดซับตะกั่วด้วยไคโตซานมีค่า b สูงกว่าการดูดซับปรอท (0.0798 และ 0.0348 ตามลำดับ) แสดงว่าตะกั่วดูดซับบนไคโตซานด้วยแรงที่มากกว่าปรอท ตามสมการ $b = k_a/k_d$ เมื่อ k_a หมายถึง อัตราการดูดซับ และ k_d หมายถึง อัตราการคายการดูดซับ ถ้า b มีค่าสูง แสดงว่ามีการดูดซับมาก แต่หากนำค่า X_m และ b ของทั้งตะกั่ว และปรอทมาเปรียบเทียบกันพบว่าไม่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักทั้งนี้ก็เนื่องมาจากผลของค่าความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electronegativity: EN) เลขวาเลนซ์ (Valency number) และรัศมีไอออน หรือขนาดอะตอมที่ใกล้เคียงกันจึงมีสมบัติจำเพาะต่างๆ ที่ใกล้เคียงกัน (โดยตะกั่วจะมีค่ามากกว่าปรอทเล็กน้อย)

จาก ค่า K และ $1/n$ ในสมการของฟรอนดลิช ทำให้ทราบว่า ไคโตซานสามารถดูดซับ ตะกั่วได้สูงกว่าปรอท เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับด้วยค่า X_m ในสมการ แลงมัวร์ โดยมีค่า K สำหรับการดูดซับตะกั่ว และปรอท เท่ากับ 204.6444 และ 141.2538 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ส่วนค่า $1/n$ สำหรับการดูดซับตะกั่ว และปรอท เท่ากับ 0.3649 และ 0.3039 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า $1/n$ ยังสามารถทำนายถึงลักษณะการดูดซับเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่อ $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าไคโตซานสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่ถ้า $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงว่า ไคโตซานจะดูดซับโลหะหนักได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ค่า $1/n$ น้อยกว่า 1 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ค่า n มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่า พลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยไอออนของโลหะหนักมากขึ้น (Faust and Aly,1987)



รูปที่ 4.10 สมการการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตซานตามสมการ Langmuir (A) และ Freundlich (B)



รูปที่ 4.11 สมการการดูดซับปรอทด้วยไคโตซานตามสมการ Langmuir (A) และ Freundlich (B)

เมื่อเปรียบเทียบค่า X_m ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับค่า X_m ของงานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงว่าไคโตซานที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการตามงานวิจัยนี้มีสมบัติการดูดซับตะกั่ว และปรอทที่สูงมาก

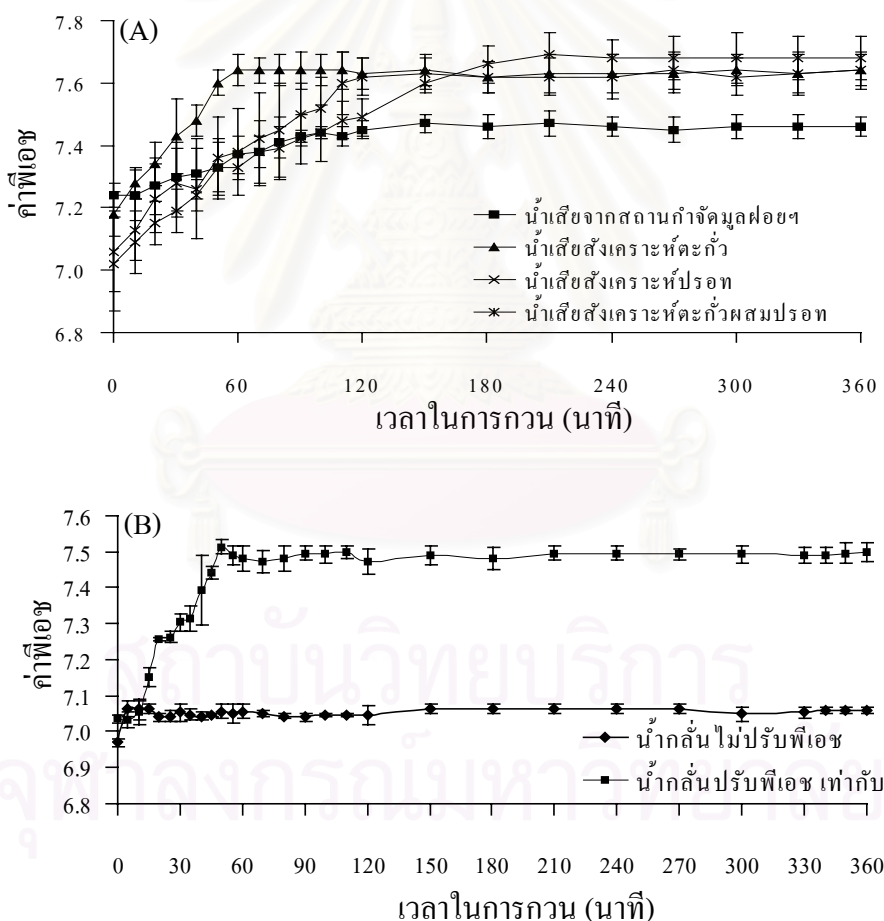
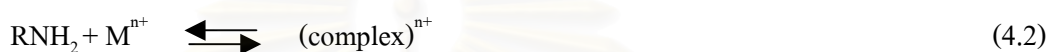
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ที่คำนวณได้จากสมการของแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) และ ฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) ในการดูดซับตะกั่ว และปรอทด้วยไคโตซาน

แหล่งที่มา	ค่าคงที่ของแลงมัวร์			ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิช		
	b	X_m (mg/g)	R^2	K (mg/g)	1/n	R^2
1. การทดลอง;						
Pb	0.0798	1.43×10^3	0.9985	204.6444	0.3649	0.8120
Hg	0.0348	1.00×10^3	0.9990	141.2538	0.3039	0.7928
2. Covas C.P. (1992);						
Hg	-	43.0	-	-	-	-
3. Aung N.N. (1997);						
Cu	17.15	2.31	-	-	0.5720	-
Cr	156.25	0.04	-	-	1.8188	-
Pb	185.19	26.80	-	-	0.7307	-

4.7.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียประเภทต่างๆ ในระหว่างการกวน

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำประเภทต่างๆ ในระหว่างการกวนกับไคโตซานดังรูปที่ 4.12 (A) พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากสถานะที่เหมาะสม คือ 6 ทั้งนี้เมื่อเติมไคโตซานเป็น 7.0-7.2 ตามประเภทของน้ำเสียจนเข้าสู่สถานะสมดุล ค่าพีเอชของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ เพิ่มขึ้นจาก 7.2 เมื่อเริ่มต้นเป็น 7.8 ภายในเวลา 100 นาที น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 7.2 เมื่อเริ่มต้นเป็น 7.6 ภายในเวลา 50 นาที น้ำเสียสังเคราะห์ปรอทเพิ่มขึ้นจาก 7.0 เมื่อเริ่มต้นเป็น 7.7 ภายในเวลา 180 นาที และน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมเพิ่มขึ้นจาก 7.1 เมื่อเริ่มต้นเป็น 7.6 ภายในเวลา 120 นาที (ตารางที่ ก.10.3-ก.10.6 ภาคผนวก ก) หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำกลั่นในรูปที่ 4.12 (B) น้ำกลั่นที่มีการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 6 พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทันทีเป็น 7.0 เมื่อเติมไคโตซานลงไป และเปลี่ยนแปลงตามเวลาการกวนจนเข้าสู่สถานะสมดุลที่พีเอช 7.6 ภายในเวลา 50 นาที แต่ค่าพีเอชจะคงที่ตลอดระยะเวลาการกวนหากไม่มีการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 6 ในตอนเริ่มต้น อธิบายได้ว่าน่าจะเกิดจาก หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่เอมีนบนไคโตซานถูก

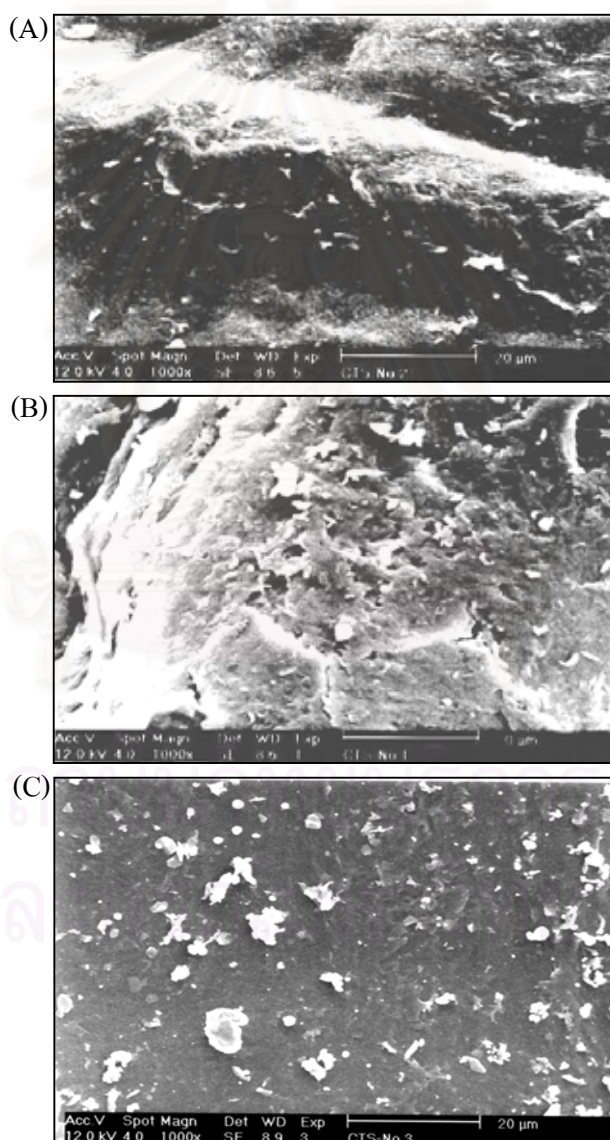
กระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจากสถานะสมดุลเดิม เข้าสู่สถานะสมดุลของการแตกตัวใหม่ อย่างไรก็ตามข้อพิสูจน์ของสมมติฐานนี้อยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัย จากผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ดังกล่าวข้างต้น แสดงว่าค่าพีเอชที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักที่แท้จริง คือ 7.6-7.8 โดยที่สถานะนี้การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียน่าจะเกิดจากการเกิดสารเชิงซ้อนของโลหะหนักกับหมู่ไฮดรอกซิลบนไคโตซานด้วยแรงประจุตรงข้ามกันตามสมการ (4.1) พร้อมทั้งกับการเกิดสารเชิงซ้อนของโลหะหนักกับหมู่เอมีนของไคโตซานตามสมการ (4.2) โดยมีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่และหมู่เอมีน 1 หมู่บนไคโตซานจะจับกับโลหะหนัก (Wu et al., 1999)



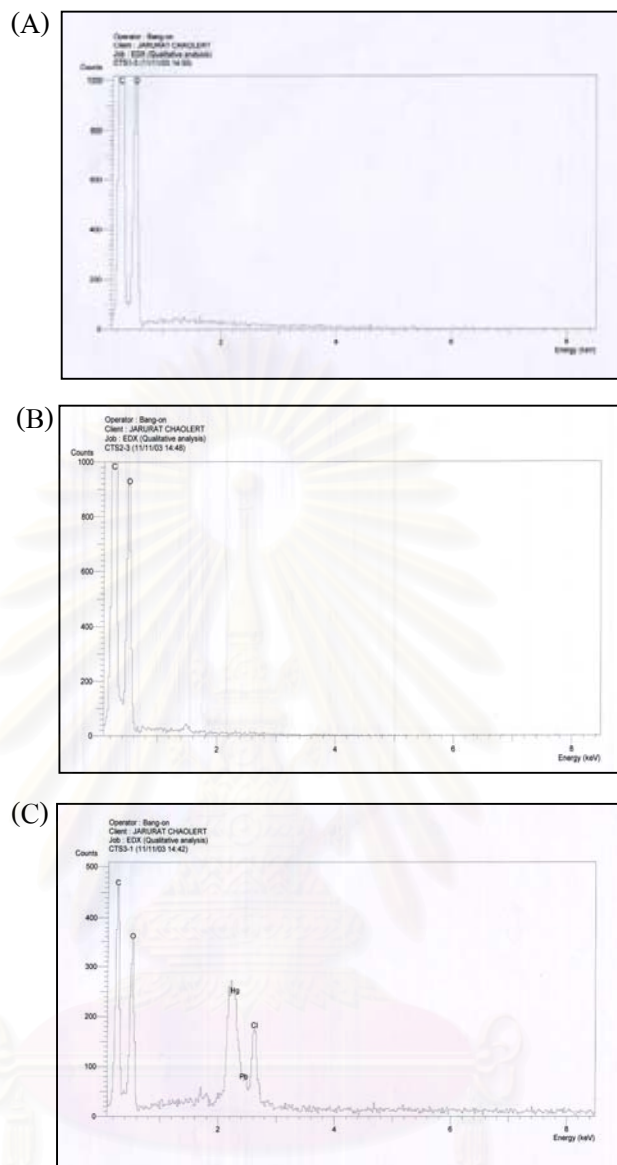
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียประเภทต่างๆ (A) และน้ำกลั่น (B) ในระหว่างการกวน

4.7.3 ผลการศึกษาโคโตซานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการศึกษาโคโตซานก่อนใช้บำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังรูปที่ 4.13 (A) แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวของโคโตซานมีลักษณะเป็นเนื้อแน่นเดียวกัน แต่หลังจากใช้บำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท ดังรูปที่ 4.13 (B และ C) พบว่าที่พื้นผิวมีชั้นวัสดุอื่นปกคลุมผิวของเนื้อโคโตซานเดิมไว้ และจากผลการศึกษาโคโตซานด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray analysis (EDX) ยืนยันผลว่าเศษวัสดุที่ปกคลุมผิวเดิมของโคโตซาน คือ ตะกั่ว และปรอท ตามรูปที่ 4.14 (A, B และ C)



รูปที่ 4.13 ภาพขยายพื้นผิวของโคโตซานเมื่อดูด้วยกล้อง SEM ก่อนตกตะกอนกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย (A) หลังตกตะกอนกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ (B) และหลังตกตะกอนกับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท (C)



รูปที่ 4.14 ธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของไคโตซานเมื่อดูด้วยเครื่อง EDX ก่อนตกตะกอนกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย (A) หลังตกตะกอนกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ (B) และหลังตกตะกอนกับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท (C)

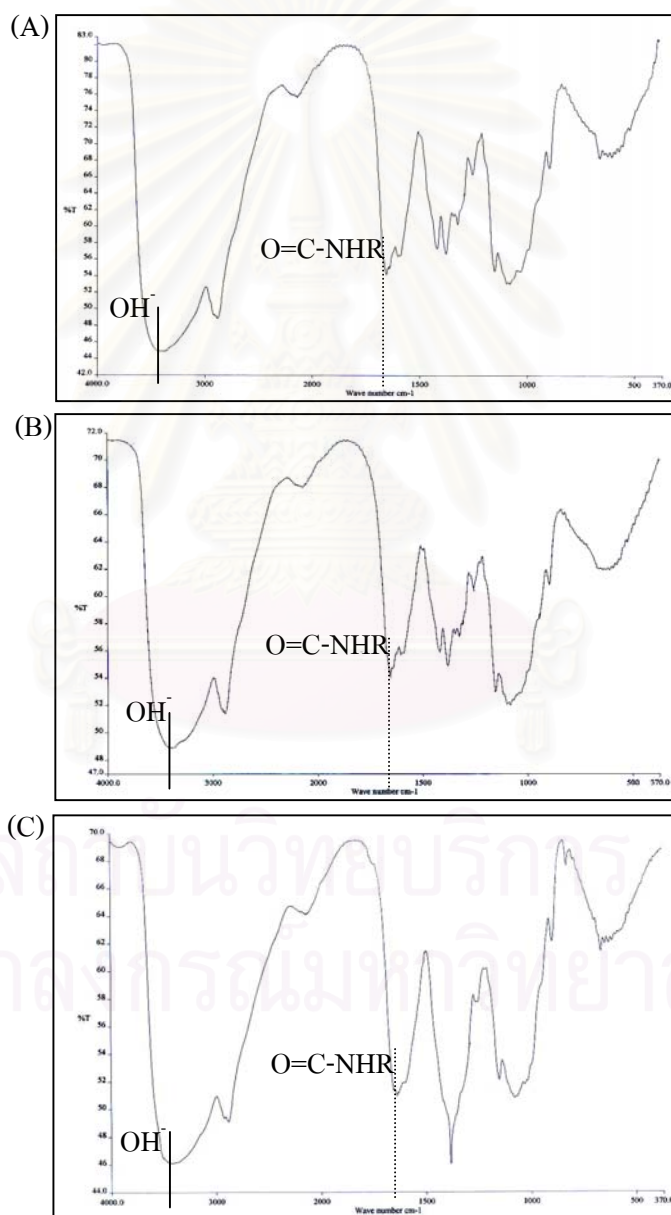
4.7.4 ผลการศึกษาไคโตซานด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

จากรูปที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไคโตซานก่อน และหลังใช้บำบัดกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอทเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งกราฟของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และอะเซตาไมด์บนไคโตซานก่อนและหลังการตกตะกอนกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท พบว่า

ตำแหน่งกราฟของหมู่ฟังก์ชันทั้งสองหลังการตกตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก จึงไม่สามารถที่จะยืนยันผลได้ว่าหมู่ฟังก์ชันทั้งสองหมู่เกิดพันธะกับตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียฯ ได้

ตารางที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันของโคโคซานก่อน และหลังใช้บำบัดกับน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

หมู่ฟังก์ชัน	Wave number (cm ⁻¹)		
	(A)	(B)	(C)
OH ⁻	3373.85	3391.16	3423.34
O=C-NHR	1655.30	1654.61	1638.59



รูปที่ 4.15 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของโคโคซานเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ก่อนตกตะกอน (A) และ หลังตกตะกอนในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ (B) และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท (C)

4.8 ผลการศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก การคัดเลือก และพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียในตะกอนโคลโตซาน

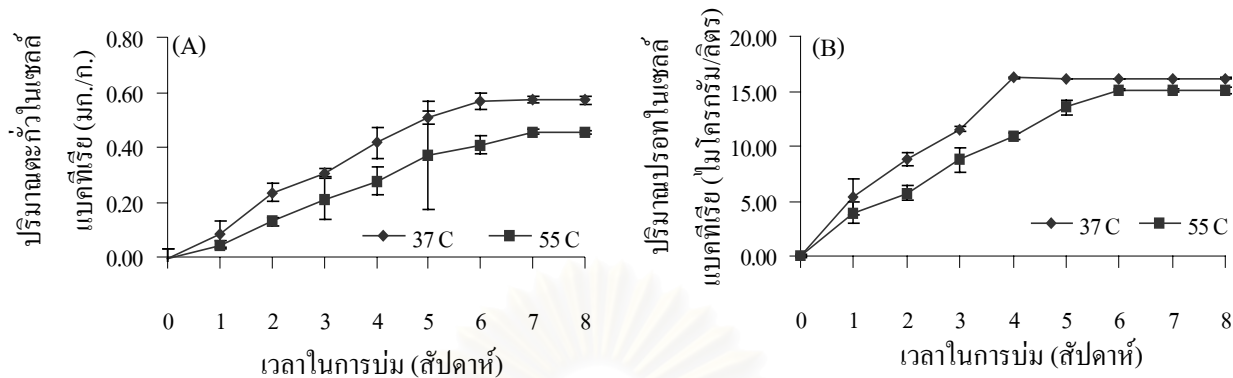
4.8.1 ผลการศึกษาอัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนักในตะกอนโคลโตซาน

ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.6.1 ว่า กลไกการดูดซับโลหะหนักของจุลินทรีย์ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการสะสมโลหะหนักที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งเซลล์มีชีวิต และเซลล์ไม่มีชีวิต และขั้นตอนที่สอง เป็นการสะสมโลหะหนักที่ขึ้นกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ ซึ่งเกิดช้ากว่าขั้นตอนแรก และเกิดขึ้นกับเซลล์มีชีวิตเท่านั้น โดยในขั้นตอนการสะสมโลหะที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ การดูดซับโลหะหนักเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากที่บริเวณผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกจะประกอบด้วยกรดไทคูโรนิก และกรดไทโคอิก โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดไทคูโรนิก และหมู่ฟอสโฟไดเอสเทอร์ของกรดไทโคอิก ที่มีประจุลบมีส่วนในการดูดซับโลหะหนัก ในขณะที่แบคทีเรียแกรมลบ ผนังเซลล์มีหมู่คาร์บอกซิลิกในเปปทิโดไกลแคน และหมู่ฟอสฟอริกในลิพอพอลิแซ็กคาไรด์ ทำหน้าที่ในการจับโลหะหนักไว้กับเซลล์แบคทีเรียทั้งในสภาวะที่มีชีวิตอยู่ และตายแล้ว

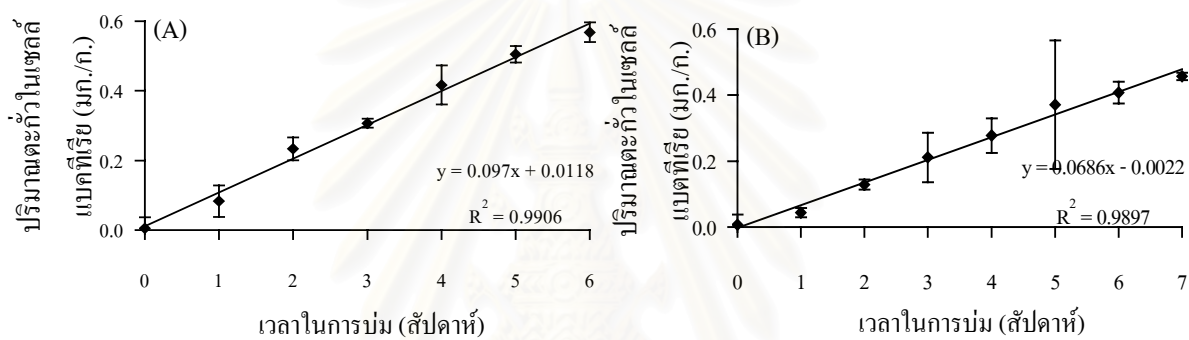
การเปลี่ยนรูปตะกั่ว และปรอทโดยเซลล์แบคทีเรีย ณ เวลาในการบ่มต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.16 (A, B) พบว่าการเปลี่ยนรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการบ่มจนมีค่าค่อนข้างคงที่หลังสัปดาห์ที่ 6 และการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนรูปตะกั่ว และปรอท มากกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยเมื่อพล็อตปริมาณโลหะหนักในเซลล์แบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37 และ 55 องศาเซลเซียส กับเวลาในการบ่ม ตั้งแต่เริ่มต้นการบ่มจนถึงสัปดาห์ที่ 6 ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ความชันคืออัตราการเปลี่ยนรูปโลหะหนัก โดยที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนรูปตะกั่ว และปรอท มีค่าเท่ากับ 0.097 มิลลิกรัม/กรัมโคลโตซาน-สัปดาห์ และ 3.8488 ไมโครกรัม/กรัมโคลโตซาน-สัปดาห์ ดังรูปที่ 4.17 (A) และ 4.18 (A) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนรูปตะกั่ว และปรอท มีค่าเท่ากับ 0.0686 มิลลิกรัม/กรัมโคลโตซาน-สัปดาห์ และ 2.4966 ไมโครกรัม/กรัมโคลโตซาน-สัปดาห์ (รูปที่ 4.17 (B) และ 4.18 (B)) ตามลำดับ

เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยเซลล์แบคทีเรีย ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับปริมาณโลหะหนักที่ตะกอนโคลโตซานดูดซับไว้ (รูปที่ 4.5) กล่าวคือ ปริมาณตะกั่ว และปรอทในเซลล์แบคทีเรีย เท่ากับ 0.57 มิลลิกรัม/กรัม และ 16.20 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ ส่วนในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน

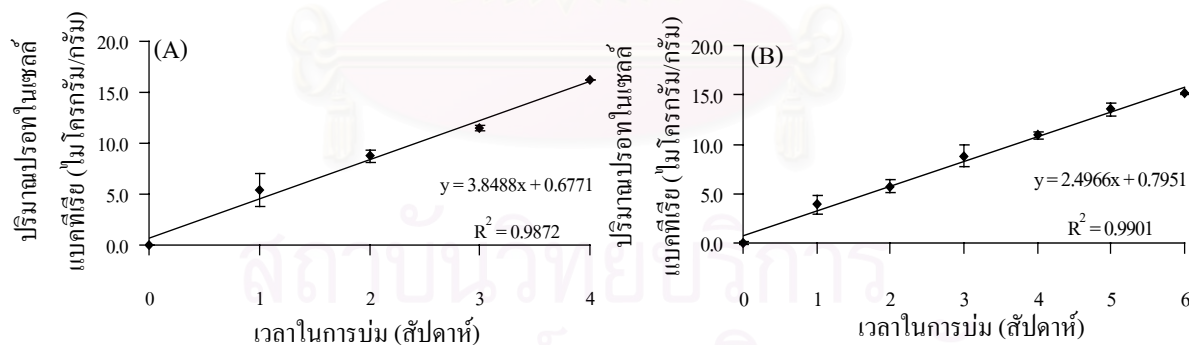
2546) ไคโตซานสามารถดูดซับตะกั่ว และปรอท ได้เท่ากับ 0.59 มิลลิกรัม/กรัม และ 16.63 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ปริมาณตะกั่ว (A) และปรอท (B) ที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยเซลล์แบคทีเรีย ณ เวลาในการบ่มต่างๆ



รูปที่ 4.17 ปริมาณตะกั่วที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยเซลล์แบคทีเรีย ตั้งแต่เริ่มต้นการบ่มจนถึงสัปดาห์ที่ 6 ของรูปที่ 4.15 (A) 37 องศาเซลเซียส (B) 55 องศาเซลเซียส



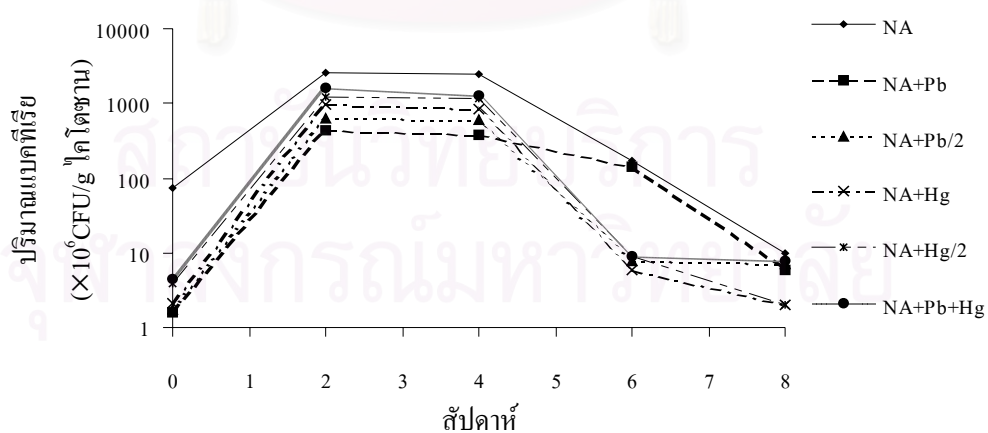
รูปที่ 4.18 ปริมาณปรอทที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยเซลล์แบคทีเรีย ตั้งแต่เริ่มต้นการบ่มจนถึงสัปดาห์ที่ 6 ของรูปที่ 4.15 (A) 37 องศาเซลเซียส (B) 55 องศาเซลเซียส

4.8.2 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์แบคทีเรียที่มีอยู่ในตะกอนไคโตซาน

จากการทดลองยืนยันสมมติฐานของการเกิดแบคทีเรียบนตะกอนไคโตซาน ด้วยการนับจำนวนโคโลนีแบคทีเรียที่เกิดขึ้น พบว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ตรวจไม่พบแบคทีเรีย แต่จากหัวข้อ 4.8.1 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักในตะกอนไคโตซาน

ณ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสด้วย เป็นไปได้ว่า แบคทีเรียเจริญได้ดี ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และยังคงเจริญอยู่ได้ ณ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แต่การที่ไม่สามารถตรวจพบแบคทีเรียจาก ตะกอนที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้บ่ม 24 ชั่วโมง ในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียประเภททนอุณหภูมิสูงเพื่อนับจำนวน โคโลนี ตามข้อ 2 ของหัวข้อ 3.3.3 ใช้ เวลาในการบ่มสั้นเกินไป

รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณ โคโลนีแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณแบคทีเรีย ณ เวลาเริ่มต้นประมาณ $1.63 \times 10^6 - 7.4 \times 10^7$ CFU/g ไลโคซาน เพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงสัปดาห์ที่ 2-4 โดยสามารถตรวจวัดปริมาณแบคทีเรียได้ประมาณ $3.85 \times 10^8 - 2.56 \times 10^9$ CFU/g ไลโคซาน และจากนั้นมีปริมาณลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.8.1 ที่พบว่าปริมาณโลหะหนักในตะกอนไลโคซานมีการเปลี่ยนรูปโดยเซลล์แบคทีเรียได้สูงสุดหลังสัปดาห์ที่ 4 สำหรับปรอท และหลังสัปดาห์ที่ 6 สำหรับตะกั่ว นอกจากนี้ปริมาณ โคโลนีแบคทีเรียในอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีทั้งตะกั่ว และปรอทมีค่ามากที่สุด แสดงว่า ตะกอนไลโคซานหลังใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ โดยพบทั้งแบคทีเรียแกรมบวก *Bacillus spp.* มีลักษณะเป็นโคโลนีสีขาวขุ่น ผิวด้านขอบเป็นหยักขนาดใหญ่ เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ เห็นว่าเซลล์ติดสีน้ำเงินมีลักษณะเป็นรูปแท่ง มีสปอร์อยู่ตรงกลาง เซลล์เรียงต่อกันเป็น โซ่มีทั้งสั้น และยาว และพบแบคทีเรียแกรมลบ มีลักษณะเป็นโคโลนีสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว จากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ เห็นว่าเซลล์ติดสีแดงเป็นรูปแท่งกระจายตัว 2 ชนิด และ จากการระบุสายพันธุ์เชื้อแบคทีเรียแกรมลบโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พบว่าแบคทีเรียดังกล่าว ได้แก่ *Pseudomonas fluorescens* กับ *Acinetobacter sp.*



รูปที่ 4.19 ปริมาณแบคทีเรียในตะกอนไลโคซานหลังการบ่ม ณ เวลาต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วยเกลือโคโคซาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โคโคซานสามารถกำจัดตะกั่ว และปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ที่ช่วงความเข้มข้น เท่ากับ 0.21-3.10 และ 0.0027-0.0881 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยใช้เกลือโคโคซาน 20 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตรปรับพีเอชให้เท่ากับ 6 จะสามารถกำจัดตะกั่ว และปรอทได้ประมาณร้อยละ 95 และเวลาในการกวน 3 ชั่วโมง เป็นเวลาที่นานเพียงพอที่กระบวนการดูดซับ ตะกั่ว และปรอทด้วยโคโคซานเข้าสู่ภาวะสมดุล ในขณะเดียวกัน โคโคซานสามารถลดปริมาณ COD, BOD และ TSS ได้

2. อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) ในขั้นตอน Intraparticle diffusion สำหรับการดูดซับตะกั่ว และปรอทด้วยโคโคซานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว และปรอทต่างๆ กัน พบว่าค่า k_1 เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น และค่า k_1 ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมให้ค่าสูงกว่าค่า k_1 ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว และในน้ำเสียจริง แสดงให้เห็นว่า การมีตะกั่ว และปรอทอยู่ด้วยกันในน้ำเสีย ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับบนโคโคซานมากขึ้น และเร็วขึ้น

3. การมีตะกั่ว และปรอทอยู่ด้วยกันในน้ำเสีย ทำให้ปริมาณตะกั่ว และปรอทที่ถูกดูดซับโดยโคโคซานเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา โดยปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมมากกว่าปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงว่าปรอทช่วยให้การดูดซับตะกั่วสูงขึ้น มากกว่าฤทธิ์ของตะกั่วที่มีผลต่อการดูดซับปรอทโดยโคโคซาน

4. การอธิบายกลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยสมการแลงมัวร์ให้ความสัมพันธ์ที่ดีกว่าด้วยสมการฟรุนดลิช โดยโคโคซานมีความสามารถในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 1,430 มิลลิกรัมตะกั่ว/กรัมโคโคซาน และ 1,000 มิลลิกรัมปรอท/กรัมโคโคซาน ตามลำดับ

6. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียเกิดจากการเกิดสารเชิงซ้อนของโลหะหนักกับหมู่ไฮดรอกซิลบนไคโตซานด้วยแรงประจุตรงข้ามกัน พร้อมๆ กับการเกิดสารเชิงซ้อนของโลหะหนักกับหมู่เอมีนของไคโตซาน โดยมีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ และหมู่เอมีน 1 หมู่บนไคโตซานจะจับกับโลหะหนัก

7. การเปลี่ยนรูปตะกั่ว และปรอทโดยเซลล์แบคทีเรียมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการบ่ม และการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนรูปตะกั่ว และปรอทได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สามารถนับปริมาณ และพิสูจน์เอกลักษณ์เชื้อแบคทีเรียได้เฉพาะที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยพบแบคทีเรียแกรมบวก *Bacillus spp.* แบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *Pseudomonas fluorescens* กับ *Acinetobacter sp.* ซึ่งข้อมูลของสายพันธุ์แบคทีเรียที่ได้ดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดการกับกากตะกอนที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วยเกลือไคโตซาน ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

1. ความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่ฟังก์ชันบนไคโตซานที่ค่าพีเอชต่างๆ ต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย
2. การวิเคราะห์รูปแบบของสารเชิงซ้อนโลหะหนักในเซลล์จุลินทรีย์ทั้งในสภาวะที่มีชีวิต และตายแล้ว
3. การเปรียบเทียบสมรรถนะของไคโตซานจากบริษัทผู้ผลิตต่างๆ ในประเทศ ที่มีสมบัติร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิลต่างๆ กัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2536. ข้อเปรียบเทียบวิธีการกำจัดมูลฝอย. ใน รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่องการศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการกำจัดมูลฝอย. หน้า 4-6. กรุงเทพมหานคร.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2540. มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. ใน เกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำ และมาตรฐานคุณภาพน้ำประเทศไทย. หน้า 20-22. กรุงเทพมหานคร.
- เกศสุखा พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกษม สีดอกบัว. 2543. การกำจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสียโดยโคโคซาน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนฉัตร ทรพพนนันท์ และ ธเรศ ศรีสถิตย์. 2535. การปนเปื้อนของปรอท แคดเมียม และ แมงกานีสในน้ำชะมูลฝอยจากสถานกำจัดมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม. ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม): 46-55.
- ธีรวิทย์ ทับทอง. 2541. การดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งที่ถูกตรึงเป็นเม็ด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- บุญชัย โชติวิริยานิชย์. 2533. การปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับก๊าซผสมโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. 2544. สถานการณ์ขยะ. ใน รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2544. หน้า 4-12. กรุงเทพมหานคร.
- เยาวภา ไหวพริบ. 2534. การผลิตไคติน และโคโคแซนจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รามนรี เนตรวิเชียร. 2543. การกำจัดสารหนูในรูปอาร์ซีนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เกลือโคโคซานแบบเม็ด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วินัย สมบูรณ์. 2541. การบำบัดโลหะหนักด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติ. รายงานสัมมนาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 10-18.

- วีรวรรณ ปัทมาภีร์ต. 2530. การศึกษาคุณลักษณะของ Leachate จากที่ทิ้งขยะบริเวณซอยอ่อนนุช และ การบำบัดทางชีววิทยา. พุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัย และพัฒนาของคณะ วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2543. ประโยชน์ของไคติน และไคโตซาน. ใน Chitin Chitosan. หน้า 5-7. กรุงเทพมหานคร.
- สุราษฎร์ ภูอินทร์ และ อมรา จันทนโอ. 2540. วิธี Plate count. ใน วิทยาแบคทีเรียดีเทอร์มิเนตีฟ ปฏิบัติการ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 58-59. กรุงเทพมหานคร.
- อินทรา หาญพงษ์พันธ์ และบัญชา พูลโกคา. 2545. กรด-เบส ใน เคมีทั่วไป: สำหรับนิสิตวิศวกรรม ศาสตร์. หน้า 159-189. กรุงเทพมหานคร
- อรุณี เทอดเทพพิทักษ์. 2534. การกำจัดโลหะหนักบางตัวในน้ำทิ้งโดยใช้เกลือไคโตซานจากเปลือกปูที่ เหลือทิ้ง. มหาวิทยาลัยบูรพา.

ภาษาอังกฤษ

- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. 1992. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 18th ed. Washington D.C.
- Austin. P.R. 1988. Chitin Solutions and Purification of Chitin. Method in Enzymology. 61: 403-407.
- Bassi R., Prasher S. O. and Simoson B. K. 1999. Remediation of Metal-contaminated Leachate using Chitosan Flakes. Environmental Technology. 20: 1177-1182.
- Beveridge T.J. 1989. The Immobilized of Solute Metals by Bacteria Walls. Biotechnology and Bioengineering Symp. 6(1): 127-139.
- Cabib E., Shaw J.A., Mol P.C., Bowers B. and Choi W.J. 1996. Chitin Biosynthesis and Morphogenetic Processes. In The Mycota III. Biochemistry and Molecular Biology. pp.243-267. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Caldwell D.R. 2000. The Subcellular Structures of Microbes. In Microbiology Physiology and Metabolism. pp. 10-12. Star Publishing company.
- Chang T.N. 1988. Color Removal from On-Nooch's Leachate by Chemical Treatment. Master's Thesis. School of Environment Resources and Development. Asian Institute of Technology.
- Covas C.P., Alvarez L.W. and Monal W.A. 1992. The Adsorption of Mercuric Ion by Chitosan. Journal of Applied Polymer Science.46: 1147-1150.

- Crist R.H., Oberholser K., McGarrity J., Crist D.R., Johnson J.K. and Brittsan J.M. 1992. Interaction of Metal and Protons with Algae. Environmental Science and Technology. 26(3): 496-502.
- Danals S.L. 1995. Environmental Soil Chemistry. pp.99-139. USA: Academic press.
- Eckenfelder W.W. 1996. Industrial Water Pollution Control 2nd.ed. pp.263-291. New York: CBI Publishing.
- Faust S.D. and Aly O.M. 1987. Adsorption Process for Water Treatment. New York: Butterworth.
- Fergusson J.E. 1990. Mercury and Lead. In The Heavy Element: Chemistry, Environment Impact and Health effect. pp.19-61. Great Britain: Pergamon press.
- Gadd G.M. 1990. Fungi and Yeast for Metal Accumulation. In Microbial Mineral Recovery. pp.249-276. New York: McGraw-Hill.
- Goosen M.F.A. 1997. Application of Chitin and Chitosan. Landcaster: Technomic Publishing Company, Inc.
- Hayes E.R. 1988. Determination of the Degree of Acetylation of Chitin and Chitosan. Method in Enzymology. 161: 443-446.
- Holan Z.R., Volesky B. and Prasetyo I. 1993. Biosorption of Cadmium by Biomass of Marine Algae. Biotechnology and Bioengineering. 41(8): 819-825.
- Kask U. and Rawn J.D. 1993. Atomic Structure and the Periodic Table. In General Chemistry. pp.231-245. England: Wm. C. Brown Publisher.
- Knorr D. 1991. Recovery and Utilization of Chitin and Chitosan in Food Processing Waste Management. Food Technology. 1: 114-122.
- Kupongsak. S. 1995. Deacetylated Chitin Used as Absorbent in Clarification of Pineapple Syrup Production. Master's Thesis. Agriculture, Aquatic Systems and Engineering Program. Asian Institute of Technology.
- Kuyucak N. and Volesky B. 1989. The Mechanism of Cobalt Biosorption. Biotechnology and Bioengineering. 33(7): 823-831.
- Luef E., Prey T. and Kubicek C.P. 1991. Biosorption of Zinc by Fungi Micelial Waste. Applied Microbiology and Biotechnology. 34(6): 688-692.
- Mattuschka B. and Straube G. 1993. Biosorption of Metals by Waste Biomass. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 58(1): 57-63.
- Muzzarelli R.A.A. 1977. Chitin. Great Britain. Pergamon Press. 309 p.
- Nyein N.A. 1997. Adsorption/Desorption of Heavy Metals Using Chitosan. Master's Thesis. School of Environment Resources and Development. Asian Institute of Technology.

- Noll K.E., Gounaris V. and Hou W.S. 1992. Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control. United States.
- Patterson J.W., Industrial Wastewater Treatment Technology, Boston, 1985.
- Poonpolwatanaporn P. 2000. Potential Leachability of Toxic Heavy Metals in Bangkok Sewage Sludge. Master's Thesis. School of Environment Resources and Development. Asian Institute of Technology.
- Prasad M.N.V. 2001. Bacteria. In Metals in the Environment. pp.1-36. New York: Marcel Dekker.
- Reed B.E., Robertson J. and Jamil M. 1995. Regeneration of Granular Activated Carbon (GAC) Columns Used for Removal of Lead. Journal of Environmental Engineering. 121(8): 653-662.
- Rose A.H. 1976. Transport of Compound into and out of Micro-organisms. In Chemical Microbiology. pp.159-179. New York: Butterworths.
- Said O.B., Shalmer M.B. and Egila J.N. 1993. A Note on the Binding of Nickel and Copper Ions by Cellulose Materials. Bioresource and Technology. 43: 63-65.
- Sang M.H. 2003. IR and 13C NMR analysis of chitin and chitosan [Online] Available from: <http://user.chollian.net/~chitin/chitin1.gif> [2003, October 26]
- Senior E. 1995. Landfill Leachate Treatment In Microbiology of landfill Sites. pp.132-155. New York: Lewis Publishers.
- Sivapornpun V. 2000. Heavy Metal in Landfill Leachate: Options for Reduction and Treatment. Master's Thesis. School of Environment Resources and Development. Asian Institute of Technology.
- Slejko F.L. 1985. Adsorption Technology: A Step-by-step Approach to Process Evaluation and Application. New York: Marcel Dekker.
- Sunstorm D.W. and Klei H.B. 1997. Wastewater Treatment. pp. 241-273. England: Cliffi Prentice-Hall.
- Wu F.C., Tseng R.L. and Juang R.S. 1999. Role of pH in Metal Adsorption from Aqueous Solution Containing Chelating Agents on Chitosan. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol.38(1): 270-275.
- Yang T. C. and Zall R. R. 1984. Absorption of Metal by Natural Polymer Generated from Seafood Processing waste. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol.3: 163-172.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ก.1 ผลการเตรียม ไลโคติน ไลโคซานจากเปลือกกุ้ง

ตารางที่ ก.1 ผลการเตรียม ไลโคติน และไลโคซานจากเปลือกกุ้ง

ชุด	น้ำหนักเปลือกกุ้ง (g)	น้ำหนักไลโคติน (g)	% yield ไลโคตินเทียบกับเปลือกกุ้ง	น้ำหนักไลโคติน (g)	น้ำหนักไลโคซาน (g)	% yield ไลโคซานเทียบกับไลโคติน	% yield ไลโคซานเทียบกับเปลือกกุ้ง
1	150.00	71.91	47.94	50.00	37.12	74.24	40.50
2	150.00	72.26	48.17	50.00	35.25	70.50	38.42
3	144.75	68.21	47.12	50.00	34.87	69.74	38.00
4	50.00	32.71	65.42	50.00	36.26	72.52	39.52
5	61.77	35.12	56.86	50.00	37.29	74.58	40.65
6	49.07	30.55	62.26	50.00	37.05	74.10	40.38
7	150.00	72.08	48.05	50.00	38.08	76.16	41.51
8	75.00	53.09	70.79	50.00	34.21	68.42	37.29
9	96.61	60.25	62.36	50.00	35.72	71.44	38.93
10	94.75	61.44	64.84	50.00	35.26	70.52	38.43
รวม	1022.15	557.62	57.38	500.00	361.11	72.22	39.40

ก.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช

ตารางที่ ก.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช

ครั้งที่	วันที่	ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้น (mg/l)	ค่าพีเอช	หมายเหตุ
1	17 ส.ค. 2545	Cr	0.0161	7.21	เพื่อทดสอบว่าตะกั่วและปรอทมีปริมาณมากที่สุด
		Cr ⁺⁶	0.0093		
		Cd	0.0261		
		Pb	0.2113*		
		Hg	0.0027*		
2	22 ต.ค. 2545	Cr	0.0186	7.02	เพื่อทดสอบสภาวะในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช
		Cr ⁺⁶	0.0095		
		Cd	0.0293		
		Pb	1.0900*		
		Hg	0.0022*		
3	19 ก.พ. 2546	Cr	-	6.98	เพื่อทดสอบสภาวะในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช
		Cr ⁺⁶	-		
		Cd	-		
		Pb	0.3345*		
		Hg	0.0044*		
4	21 มี.ค. 46	Cr	-	7.02	เพื่อทดสอบสภาวะในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช
		Cr ⁺⁶	-		
		Cd	-		
		Pb	0.3490*		
		Hg	0.0032*		
5	30 เม.ย. 2546	Cr	-	7.07	-
		Cr ⁺⁶	-		
		Cd	-		
		Pb	3.0992*		
		Hg	0.0881*		
6	7 ก.ค. 2546	Cr	-	7.11	-
		Cr ⁺⁶	-		
		Cd	-		
		Pb	1.0025*		
		Hg	0.0351*		
7	8 ส.ค. 2546	Cr	-	6.98	-
		Cr ⁺⁶	-		
		Cd	-		
		Pb	0.2347*		
		Hg	0.0029*		

หมายเหตุ *: มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน (ตารางที่ ก.1 ภาคผนวก ค)

ก.3 ผลการทดลองร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล

ตารางที่ ก.3 ร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล

ตัวอย่างที่	น้ำหนักโคโคซานไฮโดรคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (มิลลิลิตร)				ร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ใช้ไป	เฉลี่ย	
1	1.03	12.40	21.00	8.60	8.63	87.88
		21.00	29.70	8.70		
		29.70	38.30	8.60		
2	0.85	21.70	21.10	7.40	7.43	91.61
		29.10	36.65	7.55		
		36.65	44.00	7.35		
3	1.02	21.30	29.60	8.30	8.30	82.92
		29.60	37.90	8.30		
		37.90	46.20	8.30		
4	1.01	1.00	10.00	9.00	9.07	93.93
		10.00	19.10	9.10		
		19.10	28.20	9.10		
5	1.03	0.20	9.50	9.30	9.27	94.30
		9.50	18.80	9.30		
		18.80	28.00	9.20		
					เฉลี่ย	90.09 ± 4.50

ก.4 ผลการทดลองค่าพีเอช และอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมที่สุด

ก.4.1 ผลการทดสอบการกำจัดตะกั่วด้วยเกลือโคโคซาน

1. ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเกลือโคโคซาน ณ สภาวะต่างๆ

ตารางที่ ก.4.1 การกำจัดตะกั่วด้วยเกลือโคโคซาน ณ สภาวะต่างๆ (นำตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2546)

สภาวะ	ปริมาณตะกั่วก่อน ตกตะกอนด้วยเกลือ โคโคซาน (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย
1	0.8257	0.2636	0.2592	0.2591	68.08	68.81	68.62	68.44 ± 0.31
2	0.9513	0.4827	0.4994	0.4931	49.26	47.50	48.17	48.31 ± 0.89
3	0.8257	0.2845	0.2996	0.2802	65.54	63.72	66.07	65.11 ± 1.23
4	1.0644	0.4011	0.4129	0.4113	62.32	61.21	61.36	61.63 ± 0.60
5	0.3881	0.1873	0.1952	0.1893	51.74	49.70	51.22	50.89 ± 1.06
6	1.0644	0.4227	0.4005	0.4124	60.29	62.37	61.26	61.31 ± 1.04

นำตัวอย่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2546

สภาวะ	ปริมาณตะกั่วก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย
1	0.2109	0.0509	0.0519	0.0497	75.87	75.39	76.43	75.90 ± 0.52
2	0.2254	0.1035	0.1003	0.1027	54.08	55.50	54.44	54.67 ± 0.74
3	0.2981	0.0945	0.0963	0.0925	68.30	67.70	68.97	68.32 ± 0.64
4	0.1818	0.0727	0.0738	0.0713	60.01	59.41	60.78	60.07 ± 0.69
5	0.2327	0.1082	0.1102	0.1076	53.50	52.64	53.76	53.30 ± 0.54
6	0.2181	0.0873	0.0873	0.0800	59.97	59.97	63.32	64.94 ± 1.93

น้ำตัวอย่างวันที่ 21 มีนาคม 2546

สภาวะ	ปริมาณตะกั่วก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด(%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย
1	0.2481	0.0692	0.0720	0.0711	72.11	70.98	71.34	71.48 ± 0.39
2	0.2640	0.1232	0.1198	0.1304	53.33	54.62	50.61	52.85 ± 2.05
3	0.2481	0.0837	0.0859	0.0880	66.26	65.38	64.53	65.39 ± 0.87
4	0.3367	0.1120	0.1183	0.1096	66.74	64.86	67.45	66.35 ± 1.34
5	0.2164	0.0960	0.1008	0.0984	55.64	53.42	54.53	54.53 ± 1.11
6	0.3367	0.1275	0.1200	0.1280	62.13	64.36	61.98	62.82 ± 1.33

2. ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของการกำจัด ตะกั่ว ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเกลือโคโคซาน

ตารางที่ ก.4.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของการกำจัดตะกั่ว
ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

น้ำตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2546	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	958.431	5	191.686	229.038	.000
Within Groups	10.043	12	.837		
Total	968.474	17			
น้ำตัวอย่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2546	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	780.073	5	156.015	92.941	.000
Within Groups	20.144	12	1.679		
Total	800.217	17			
น้ำตัวอย่างวันที่ 21 มีนาคม 2546	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1100.225	5	220.045	228.596	.000
Within Groups	11.551	12	.963		
Total	1111.776	17			

ตารางที่ ก.4.3 การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างสภาวะต่างๆ ในการกำจัดตะกั่ว โดย Duncan's New Multiple Range Test

น้ำตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2546						
สภาวะ	N	Subset for alpha = .05				
		1	2	3	4	5
2	3	48.3100				
5	3		50.8867			
6	3			61.3067		
4	3			61.6300		
3	3				65.1100	
1	3					68.5033
Sig		1.000	1.000	.673	1.000	1.000
น้ำตัวอย่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2546						
สภาวะ	N	Subset for alpha = .05				
		1	2	3	4	
2	3	52.8533				
5	3	54.5300				
6	3		62.8233			
3	3			65.3900		
4	3			66.3500		
1	3				71.4767	
Sig		.139	1.000	.382	1.000	
น้ำตัวอย่างวันที่ 21 มีนาคม 2546						
สภาวะ	N	Subset for alpha = .05				
		1	2	3	4	
4	3	53.3000				
2	3	54.6733				
5	3		60.0667			
6	3		61.0867			
3	3			68.3233		
1	3				75.8967	
Sig		.112	.227	1.000	1.000	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ก.4.2 ผลการทดสอบการกำจัดปรอทด้วยเกลือโคโคซาน

1. ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทด้วยเกลือโคโคซาน ณ สภาวะต่างๆ

ตารางที่ ก.4.4 การกำจัดปรอทด้วยเกลือโคโคซาน ณ สภาวะต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2546)

สภาวะ	ปริมาณปรอทก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณปรอทหลังตก ตะกอนด้วยเกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย
1	1.7569	0.1317	0.1314	0.1298	92.50	92.52	92.61	92.54 ± 0.06
2	2.2089	0.5404	0.5545	0.5663	75.54	74.90	74.36	74.93 ± 0.59
3	2.0949	0.3817	0.3834	0.3790	81.78	81.70	81.91	81.80 ± 0.11
4	1.9596	0.4168	0.3760	0.4013	78.73	80.01	79.52	79.42 ± 0.65
5	1.1163	0.2778	0.2635	0.2861	75.11	76.40	74.37	75.29 ± 1.01
6	1.2808	0.2631	0.2723	0.2709	79.46	78.74	78.85	79.02 ± 0.39

น้ำตัวอย่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2546

สภาวะ	ปริมาณปรอทก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย
1	3.5544	0.3251	0.3023	0.3146	90.85	91.50	91.15	91.19 ± 0.32
2	3.4197	0.8501	0.8436	0.8596	75.14	75.33	74.86	75.01 ± 0.24
3	2.7772	0.5043	0.5025	0.4975	81.84	81.91	82.09	81.94 ± 0.13
4	2.7876	0.5181	0.5214	0.5232	81.41	81.30	81.23	81.31 ± 0.10
5	2.3662	0.5639	0.5589	0.5392	76.17	76.38	77.21	76.59 ± 0.55
6	3.4721	0.7202	0.7419	0.7298	79.26	78.63	78.98	78.96 ± 0.32

น้ำตัวอย่างวันที่ 21 มีนาคม 2546

สภาวะ	ปริมาณปรอทก่อน ตกตะกอนด้วยเกลือ โคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย
1	3.1210	0.2112	0.2093	0.1596	93.23	93.28	94.89	93.80 ± 0.94
2	2.9756	0.6148	0.6068	0.6170	79.34	79.61	79.26	79.40 ± 0.81
3	3.0919	0.5234	0.5943	0.5298	83.07	80.78	82.86	82.24 ± 1.23
4	3.0532	0.2731	0.2621	0.2390	91.06	91.42	92.17	91.55 ± 0.57
5	2.6170	0.4662	0.5428	0.5239	82.19	79.26	79.98	80.48 ± 1.53
6	3.0283	0.5560	0.5040	0.5732	81.64	83.36	81.07	82.02 ± 1.19

2. ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของการกำจัดปรอท ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย ฯ

ตารางที่ ก.4.5 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของการกำจัดปรอท ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ ด้วยเกลือโคโคซาน

น้ำตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2546	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	624.561	5	124.912	377.271	.000
Within Groups	3.973	12	.331		
Total	628.534	17			
น้ำตัวอย่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2546	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	565.737	5	113.147	102.847	.000
Within Groups	13.202	12	1.100		
Total	578.939	17			
น้ำตัวอย่างวันที่ 21 มีนาคม 2546	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	487.678	5	97.536	994.133	.000
Within Groups	1.177	12	9.811E-02		
Total	488.855	17			

ตารางที่ ก.4.6 การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างสภาวะต่างๆ ในการกำจัดปรอท โดยวิธี

Duncan's New Multiple Range Test

น้ำตัวอย่างวันที่ 22 ตุลาคม 2546							
สภาวะ	N	Subset for alpha = .05					
		1	2	3	4		
2	3	74.9333					
5	3	75.2933					
6	3		79.0167				
4	3		79.4200				
3	3			81.7967			
1	3				92.5433		
Sig		.458	.407	1.000	1.000		
น้ำตัวอย่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2546							
สภาวะ	N	Subset for alpha = .05					
		1	2	3	4		
2	3	79.4033					
5	3	80.4767	80.4767				
6	3		82.0233				
3	3		82.2367				
4	3			91.5500			
1	3				93.8000		
Sig		.234	.073	1.000	1.000		
น้ำตัวอย่างวันที่ 21 มีนาคม 2546							
สภาวะ	N	Subset for alpha = .05					
		1	2	3	4	5	6
2	3	75.1100					
5	3		76.5867				
6	3			78.9567			
4	3				81.3133		
3	3					81.9467	
1	3						91.1667
Sig		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ก.5 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในรูปอัตราส่วนของน้ำเสียต่อปริมาณเกลือโคโคซาน และเวลาที่ใช้ในการกวน

ก.5.1 ตะกั่ว

ตารางที่ ก.5.1 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 3 ชั่วโมง

อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน	ปริมาณตะกั่วก่อนตกตะกอนด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอนด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)			การดูดซับตะกั่ว (mg/g โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
25:1	3.1459	0.6575	0.6692	0.6867	0.2488	0.2477	0.2459	0.2475 ± 0.001	79.10	78.73	78.17	78.67 ± 0.47
50:1	3.1459	0.1590	0.1591	0.1584	0.5974	0.5974	0.5975	0.5974 ± 0.000	94.95	94.94	94.96	94.95 ± 0.01
75:1	3.1459	1.3879	1.3852	1.3808	0.5279	0.5287	0.5301	0.5289 ± 0.001	55.88	55.97	56.11	55.99 ± 0.11

ตารางที่ ก.5.2 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 6 ชั่วโมง

อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน	ปริมาณตะกั่วก่อนตกตะกอนด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอนด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)			การดูดซับตะกั่ว (mg/g โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
25:1	3.0134	0.7925	0.7984	0.7925	0.2221	0.2215	0.2221	0.2309 ± 0.000	76.69	76.49	76.69	76.62 ± 0.11
50:1	3.0134	0.1698	0.1756	0.1792	0.5687	0.5676	0.5668	0.5677 ± 0.001	94.37	94.17	94.05	94.20 ± 0.16
75:1	3.0134	1.5867	1.5750	1.5984	0.4284	0.4320	0.4249	0.4284 ± 0.004	47.35	47.73	46.96	47.35 ± 0.39

ตารางที่ ก.5.3 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 12 ชั่วโมง

อัตราส่วนของน้ำเสียจาก สถานกำจัดมูลฝอยต่อ ปริมาณเกลือโคโคซาน	ปริมาณตะกั่วก่อน ตกตะกอนด้วยเกลือ โคโคซาน (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน (mg/l)			การดูดซับตะกั่ว (mg/g โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
25:1	3.1809	0.8753	0.8859	0.8837	0.2306	0.2295	0.2297	0.2299 ± 0.001	72.48	72.15	72.22	72.28 ± 0.18
50:1	3.1809	0.1833	0.1781	0.1785	0.5915	0.5926	0.5925	0.5922 ± 0.001	94.24	94.40	94.39	93.08 ± 0.09
75:1	3.1809	1.6942	1.6925	1.6968	0.4465	0.447	0.4457	0.4464 ± 0.001	46.74	46.79	46.66	46.73 ± 0.07

ก.5.2 พรอท

ตารางที่ ก.5.4 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 3 ชั่วโมง

อัตราส่วนของน้ำเสียจาก สถานกำจัดมูลฝอยต่อ ปริมาณเกลือโคโคซาน	ปริมาณพรอทก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน (µg/l)	ปริมาณพรอทหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน (µg/l)			การดูดซับพรอท (µg/g โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
25:1	85.1962	17.0149	17.0078	17.0048	6.8181	6.8188	6.8191	6.8187 ± 0.001	80.03	80.04	80.04	80.04 ± 0.01
50:1	85.2006	4.0408	4.0213	4.0361	16.2320	16.6359	16.6329	16.6336 ± 0.002	95.31	95.31	95.19	95.27 ± 0.07
75:1	85.1813	37.1074	37.1061	37.1073	14.4366	14.4370	14.4366	14.4367 ± 0.000	56.44	56.44	56.44	56.44 ± 0.00

ตารางที่ ก.5.5 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 6 ชั่วโมง

อัตราส่วนของน้ำเสียจาก สถานกำจัดมูลฝอยต่อ ปริมาณเกลือโคโคซาน	ปริมาณปรอทก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)			การดูดซับปรอท ($\mu\text{g/g}$ โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
25:1	82.7095	19.0042	19.0041	19.0042	6.3705	6.3705	6.2705	6.3372 ± 0.058	77.02	77.02	75.81	76.62 ± 0.07
50:1	82.7032	4.9838	4.9787	4.9348	15.5439	15.5449	15.5537	15.5475 ± 0.005	93.97	93.98	94.03	94.00 ± 0.03
75:1	82.7109	41.1542	41.2637	41.2577	12.4795	12.4466	12.4484	12.4582 ± 0.018	50.24	50.11	50.12	50.16 ± 0.07

ตารางที่ ก.5.6 อัตราส่วนของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยต่อปริมาณเกลือโคโคซาน เท่ากับ 25:1, 50:1 และ 75:1 ใช้เวลาในการกวน 12 ชั่วโมง

อัตราส่วนของน้ำเสียจาก สถานกำจัดมูลฝอยต่อ ปริมาณเกลือโคโคซาน	ปริมาณปรอทก่อน ตกตะกอนด้วย เกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอน ด้วยเกลือโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)			การดูดซับปรอท ($\mu\text{g/g}$ โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
		1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
25:1	79.3148	27.0248	27.0049	27.0148	7.6310	7.6310	7.6310	7.6310 ± 0.000	65.93	65.95	65.94	65.94 ± 0.01
50:1	79.3165	4.8043	4.0043	4.0042	14.9024	15.0624	15.0625	15.0091 ± 0.092	93.94	94.95	94.95	94.62 ± 0.58
75:1	79.3091	40.0043	40.0044	40.0043	12.7041	12.7041	12.7041	12.7041 ± 0.000	49.56	49.56	49.56	49.56 ± 0.00

ก.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่กับการกวนเพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

ก.6.1 น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

ตารางที่ ก.6.1 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน 2546)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไลโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	3.0992	3.0992	3.0992	3.0992 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	2.4193	2.4022	2.3966	2.4070 ± 0.01	0.1133	0.1162	0.1166	0.1154 ± 0.00
60	2.1483	2.1340	2.1316	2.1380 ± 0.01	0.1585	0.1609	0.1613	0.1602 ± 0.00
90	1.7497	1.7385	1.7587	1.7490 ± 0.01	0.2249	0.2268	0.2234	0.2250 ± 0.00
120	0.9169	0.9155	0.9097	0.9140 ± 0.00	0.3637	0.3640	0.3649	0.3642 ± 0.00
150	0.3242	0.3181	0.3209	0.3211 ± 0.00	0.4625	0.4635	0.4631	0.4630 ± 0.00
180	0.0486	0.0467	0.0503	0.0485 ± 0.00	0.5084	0.5088	0.5082	0.5084 ± 0.00
210	0.0501	0.0495	0.0458	0.0485 ± 0.00	0.5082	0.5083	0.5089	0.5085 ± 0.00
240	0.0483	0.0492	0.0480	0.0485 ± 0.00	0.5085	0.5083	0.5085	0.5085 ± 0.00
270	0.0493	0.0487	0.0481	0.0487 ± 0.00	0.5083	0.5084	0.5085	0.5084 ± 0.00
300	0.0505	0.0496	0.0492	0.0498 ± 0.00	0.5081	0.5083	0.5083	0.5082 ± 0.00
330	0.0508	0.0519	0.0513	0.0513 ± 0.00	0.5081	0.5079	0.5080	0.5080 ± 0.00
360	0.0515	0.0528	0.0504	0.0516 ± 0.01	0.5080	0.5077	0.5081	0.5079 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.2 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 7 กรกฎาคม 2546)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	1.0025	1.0025	1.0025	1.0025 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	0.7516	0.8128	0.8261	0.7968 ± 0.04	0.0502	0.0379	0.0353	0.0411 ± 0.01
60	0.5419	0.5773	0.5942	0.5711 ± 0.03	0.0921	0.0850	0.0817	0.0863 ± 0.01
90	0.4106	0.4217	0.4502	0.4275 ± 0.02	0.1184	0.1162	0.1105	0.1150 ± 0.00
120	0.2707	0.3118	0.2454	0.2760 ± 0.03	0.1464	0.1381	0.1514	0.1453 ± 0.01
150	0.0929	0.1197	0.0903	0.1010 ± 0.02	0.1819	0.1766	0.1824	0.1803 ± 0.00
180	0.0192	0.0174	0.0201	0.0189 ± 0.00	0.1967	0.1970	0.1965	0.1967 ± 0.00
210	0.0197	0.0183	0.0224	0.0201 ± 0.00	0.1966	0.1968	0.1960	0.1965 ± 0.00
240	0.0200	0.0203	0.0173	0.0192 ± 0.00	0.1965	0.1964	0.1970	0.1967 ± 0.00
270	0.0209	0.0215	0.0184	0.0203 ± 0.00	0.1963	0.1962	0.1968	0.1964 ± 0.00
300	0.0208	0.0221	0.0193	0.0207 ± 0.00	0.1963	0.1961	0.1966	0.1964 ± 0.00
330	0.0198	0.0186	0.0207	0.0197 ± 0.00	0.1965	0.1968	0.1964	0.1966 ± 0.00
360	0.0203	0.0186	0.0228	0.0206 ± 0.00	0.1964	0.1968	0.1959	0.1964 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.3 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 8 สิงหาคม 2546)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.2347	0.2347	0.2347	0.2347 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	0.1959	0.2106	0.2042	0.2036 ± 0.01	0.0078	0.0048	0.0061	0.0062 ± 0.00
60	0.1664	0.1723	0.1407	0.1598 ± 0.02	0.0137	0.0125	0.0188	0.0150 ± 0.00
90	0.1197	0.1323	0.1168	0.1229 ± 0.01	0.0230	0.0205	0.0236	0.0224 ± 0.00
120	0.1005	0.0852	0.0705	0.0854 ± 0.02	0.0268	0.0299	0.0328	0.0299 ± 0.00
150	0.0341	0.0374	0.0352	0.0356 ± 0.00	0.0401	0.0395	0.0399	0.0398 ± 0.00
180	0.0301	0.0340	0.0313	0.0318 ± 0.00	0.0409	0.0401	0.0407	0.0406 ± 0.00
210	0.0319	0.0335	0.0361	0.0338 ± 0.00	0.0406	0.0402	0.0397	0.0402 ± 0.00
240	0.0425	0.0334	0.0357	0.0372 ± 0.00	0.0384	0.0403	0.0398	0.0395 ± 0.00
270	0.0342	0.0510	0.0303	0.0385 ± 0.01	0.0404	0.0367	0.0409	0.0392 ± 0.00
300	0.0453	0.0405	0.0420	0.0426 ± 0.00	0.0379	0.0388	0.0385	0.0384 ± 0.00
330	0.0580	0.0355	0.0427	0.0454 ± 0.01	0.0353	0.0398	0.0384	0.0379 ± 0.00
360	0.0350	0.0381	0.0434	0.0388 ± 0.00	0.0399	0.0393	0.0383	0.0392 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.4 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน 2546)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/g}$ ไกโดซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	88.1000	88.1000	88.1000	88.1000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	65.1114	66.8557	64.5256	65.4976 ± 1.21	3.8314	3.5407	3.9291	3.7671 ± 0.20
60	50.8683	50.9785	50.5503	50.7990 ± 0.22	6.2053	6.1869	6.2583	6.2168 ± 0.04
90	39.5056	39.3787	38.6324	39.1722 ± 0.47	8.0991	8.1202	8.2446	8.1546 ± 0.08
120	21.8059	21.7742	21.8218	21.8006 ± 0.02	11.0490	11.0543	11.0464	11.0499 ± 0.00
150	9.0279	9.1134	8.7583	8.9665 ± 0.19	13.1787	13.1644	13.2236	13.1889 ± 0.03
180	1.3036	1.2926	1.2989	1.2984 ± 0.01	14.4661	14.4679	14.4669	14.4669 ± 0.00
210	1.2980	1.3002	1.2971	1.2984 ± 0.00	14.4670	14.4666	14.4672	14.4669 ± 0.00
240	1.3002	1.3012	1.2987	1.3000 ± 0.00	14.4666	14.4665	14.4669	14.4667 ± 0.00
270	1.3015	1.2977	1.3018	1.3003 ± 0.00	14.4664	14.4671	14.4664	14.4666 ± 0.00
300	1.3054	1.3021	1.3037	1.3037 ± 0.00	14.4658	14.4663	14.4661	14.4660 ± 0.00
330	1.3049	1.3053	13.018	1.3040 ± 0.00	14.4659	14.4658	14.4664	14.4660 ± 0.00
360	1.3101	1.3093	1.2973	1.3056 ± 0.00	14.4650	14.4651	14.4671	14.4657 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.5 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 7 กรกฎาคม 2546)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/g}$ ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	35.1000	35.1000	35.1000	35.1000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	28.5610	29.1090	27.4700	28.3800 ± 0.83	1.3078	1.1982	1.5260	1.3440 ± 0.17
60	22.7500	23.6760	23.7750	23.4003 ± 0.57	2.4700	2.2848	2.2650	2.3399 ± 0.11
90	15.4460	15.6270	17.7790	16.2840 ± 1.30	3.9308	3.8946	3.4642	3.7632 ± 0.26
120	9.0500	8.0080	9.7400	8.9327 ± 0.87	5.2100	5.4184	5.0720	5.2335 ± 0.17
150	2.0030	1.7710	2.1520	1.9753 ± 0.19	6.6194	6.6658	6.5896	6.6249 ± 0.04
180	0.7133	0.6689	0.6841	0.6888 ± 0.02	6.8773	6.8862	6.8832	6.8822 ± 0.00
210	0.7235	0.6785	0.6933	0.6984 ± 0.02	6.8753	6.8843	6.8813	6.8803 ± 0.00
240	0.7133	0.6803	0.7001	0.6979 ± 0.02	6.8773	6.8839	6.8800	6.8804 ± 0.00
270	0.7219	0.7052	0.6978	0.7083 ± 0.01	6.8756	6.8790	6.8804	6.8783 ± 0.00
300	0.7156	0.6904	0.6875	0.6978 ± 0.02	6.8769	6.8819	6.8825	6.8804 ± 0.00
330	0.7190	0.7191	0.7014	0.7132 ± 0.01	6.8762	6.8762	6.8797	6.8774 ± 0.00
360	0.7177	0.6990	0.6878	0.7015 ± 0.02	6.8765	6.8802	6.8824	6.8797 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.6 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (น้ำตัวอย่างวันที่ 30 เมษายน 2546)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/g}$ ไกโดซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	2.9000	2.9000	2.9000	2.9000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	2.7035	2.7116	2.7547	2.7233 ± 0.03	0.0393	0.0377	0.0291	0.0353 ± 0.01
60	2.2405	2.2013	2.2995	2.2471 ± 0.05	0.1319	0.1397	0.1201	0.1306 ± 0.01
90	1.9024	1.8719	1.9009	1.8917 ± 0.02	0.1995	0.2056	0.1998	0.2017 ± 0.00
120	1.3912	1.4793	1.3409	1.4038 ± 0.07	0.3018	0.2841	0.3118	0.2992 ± 0.01
150	0.9123	0.8003	0.9076	0.8734 ± 0.06	0.3975	0.4199	0.3985	0.4053 ± 0.01
180	0.3043	0.4196	0.3118	0.3452 ± 0.06	0.5191	0.4961	0.5176	0.5110 ± 0.01
210	0.3217	0.3571	0.3718	0.3502 ± 0.03	0.5157	0.5086	0.5056	0.5100 ± 0.01
240	0.4016	0.3540	0.3796	0.3784 ± 0.02	0.4997	0.5092	0.5041	0.5043 ± 0.00
270	0.3805	0.3389	0.3670	0.3621 ± 0.02	0.5039	0.5122	0.5066	0.5076 ± 0.00
300	0.3253	0.4145	0.3475	0.3624 ± 0.05	0.5149	0.4971	0.5105	0.5075 ± 0.01
330	0.4060	0.3579	0.3693	0.3636 ± 0.01	0.4988	0.5084	0.5061	0.5045 ± 0.01
360	0.3784	0.3412	0.3855	0.3634 ± 0.03	0.5043	0.5118	0.5029	0.5063 ± 0.00

ก.6.2 น้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว

ตารางที่ ก.6.7 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 mg/l)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	2.1276	2.1199	2.1353	2.1276 ± 0.01	0.1745	0.1760	0.1729	0.1745 ± 0.00
60	1.6735	1.6580	1.6667	1.6661 ± 0.01	0.2653	0.2684	0.2667	0.2668 ± 0.00
90	1.0271	1.0271	1.0107	1.0216 ± 0.01	0.3946	0.3946	0.3979	0.3957 ± 0.00
120	0.3957	0.3803	0.3112	0.3624 ± 0.04	0.5209	0.5239	0.5378	0.5275 ± 0.00
150	0.0599	0.0587	0.0595	0.0594 ± 0.00	0.5880	0.5883	0.5881	0.5881 ± 0.00
180	0.0599	0.0587	0.0595	0.0594 ± 0.00	0.5880	0.5883	0.5881	0.5881 ± 0.00
210	0.0598	0.0608	0.0601	0.0602 ± 0.00	0.5880	0.5878	0.5880	0.5880 ± 0.00
240	0.0606	0.0615	0.0599	0.0607 ± 0.00	0.5870	0.5877	0.5880	0.5879 ± 0.00
270	0.0649	0.0640	0.0649	0.0646 ± 0.00	0.5870	0.5872	0.5870	0.5871 ± 0.00
300	0.0649	0.0647	0.0639	0.0645 ± 0.00	0.5870	0.5871	0.5872	0.5871 ± 0.00
330	0.0657	0.0648	0.0641	0.0649 ± 0.00	0.5869	0.5870	0.5872	0.5870 ± 0.00
360	0.0649	0.0633	0.0647	0.0643 ± 0.00	0.5870	0.5873	0.5871	0.5871 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.8 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 1.00 mg/l)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	0.7760	0.7030	0.7140	0.7310 ± 0.04	0.0448	0.0594	0.0572	0.0538 ± 0.01
60	0.5040	0.5210	0.5010	0.5087 ± 0.01	0.0992	0.0958	0.0998	0.0983 ± 0.00
90	0.3810	0.3560	0.4070	0.3813 ± 0.03	0.1238	0.1288	0.1186	0.1237 ± 0.01
120	0.1660	0.1470	0.1730	0.1620 ± 0.01	0.1668	0.1706	0.1654	0.1676 ± 0.00
150	0.0180	0.0130	0.0160	0.0157 ± 0.00	0.1964	0.1974	0.1968	0.1969 ± 0.00
180	0.0190	0.0140	0.0180	0.0170 ± 0.00	0.1962	0.1972	0.1964	0.1966 ± 0.00
210	0.0200	0.0150	0.0170	0.0173 ± 0.00	0.1960	0.1970	0.1966	0.1965 ± 0.00
240	0.0170	0.0180	0.0200	0.0183 ± 0.00	0.1966	0.1964	0.1960	0.1963 ± 0.00
270	0.0180	0.0170	0.0190	0.0180 ± 0.00	0.1964	0.1966	0.1962	0.1964 ± 0.00
300	0.0210	0.0160	0.0220	0.0197 ± 0.00	0.1958	0.1968	0.1956	0.1961 ± 0.00
330	0.0220	0.0200	0.0230	0.0217 ± 0.00	0.1956	0.1960	0.1954	0.1957 ± 0.00
360	0.0190	0.0140	0.0200	0.0177 ± 0.00	0.1962	0.1972	0.1960	0.1965 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.9 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 0.3 mg/l)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	0.2272	0.2175	0.2242	0.2230 ± 0.01	0.0146	0.0165	0.0152	0.0154 ± 0.00
60	0.1791	0.1747	0.1806	0.1781 ± 0.00	0.0242	0.0251	0.0239	0.0244 ± 0.00
90	0.1003	0.1084	0.1102	0.1063 ± 0.01	0.0399	0.0383	0.0380	0.0387 ± 0.00
120	0.0440	0.0407	0.0461	0.0436 ± 0.00	0.0512	0.0519	0.0508	0.0513 ± 0.00
150	0.0129	0.0154	0.0180	0.0154 ± 0.00	0.0574	0.0569	0.0564	0.0569 ± 0.00
180	0.0182	0.0186	0.0148	0.0172 ± 0.00	0.0564	0.0563	0.0570	0.0566 ± 0.00
210	0.0162	0.0155	0.0176	0.0164 ± 0.00	0.0568	0.0569	0.0565	0.0567 ± 0.00
240	0.0177	0.0196	0.0141	0.0171 ± 0.00	0.0565	0.0561	0.0572	0.0566 ± 0.00
270	0.0169	0.0173	0.0160	0.0167 ± 0.00	0.0566	0.0565	0.0568	0.0567 ± 0.00
300	0.0143	0.0197	0.0178	0.0173 ± 0.00	0.0571	0.0561	0.0564	0.0565 ± 0.00
330	0.0160	0.0182	0.0170	0.0171 ± 0.00	0.0568	0.0564	0.0566	0.0566 ± 0.00
360	0.0185	0.0139	0.0166	0.0163 ± 0.00	0.0563	0.0572	0.0567	0.0567 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.10 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 88.00 $\mu\text{g/l}$)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/g}$ ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	88.0000	88.0000	88.0000	88.0000 \pm 0.00	0	0	0	0 \pm 0.00
30	63.0360	62.9260	62.9880	62.9833 \pm 0.06	4.9928	5.0148	5.0024	5.0033 \pm 0.01
60	50.5960	50.1210	51.2310	50.6493 \pm 0.56	7.4808	7.5758	7.3538	7.4701 \pm 0.11
90	33.1560	33.2180	32.2530	32.8757 \pm 0.54	10.9688	10.9564	11.1494	11.0249 \pm 0.10
120	14.5460	13.7936	13.6984	14.0127 \pm 0.46	14.6908	14.8413	14.8603	14.7975 \pm 0.09
150	1.6271	1.6280	1.6280	1.6277 \pm 0.00	17.2746	17.2744	17.2744	17.2745 \pm 0.00
180	1.6276	1.6281	1.6273	1.6277 \pm 0.00	17.2745	17.2744	17.2745	17.2745 \pm 0.00
210	1.6301	1.6269	1.6260	1.6277 \pm 0.00	12.2740	17.2745	17.2748	17.2745 \pm 0.00
240	1.6302	1.6210	1.6318	1.6277 \pm 0.00	17.2740	17.2758	17.2736	17.2745 \pm 0.00
270	1.6315	1.6318	1.6221	1.6285 \pm 0.00	17.2737	17.2736	17.2756	17.2743 \pm 0.00
300	1.6315	1.6328	1.6321	1.6321 \pm 0.00	17.2737	17.2734	17.2735	17.2736 \pm 0.00
330	1.6326	1.6330	1.6313	1.6323 \pm 0.00	17.2735	17.2734	17.2737	17.2735 \pm 0.00
360	1.6314	1.6351	1.6339	1.6335 \pm 0.00	17.2737	17.2730	17.2732	17.2733 \pm 0.00

ตารางที่ ก.6.11 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 35.00 $\mu\text{g/l}$)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/g}$ ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	35.0000	35.0000	35.0000	35.0000 \pm 0.00	0	0	0	0 \pm 0.00
30	26.1350	25.3100	26.2410	25.8953 \pm 0.51	1.7730	1.9380	1.7518	1.8209 \pm 0.01
60	20.1160	19.7030	20.1650	19.9947 \pm 0.25	2.9768	3.0594	2.9670	3.0011 \pm 0.05
90	12.4100	11.6710	11.4300	11.8370 \pm 0.51	4.5180	4.6658	4.7140	4.6326 \pm 0.01
120	6.8800	7.4350	8.4430	7.5860 \pm 0.79	5.6240	5.5130	5.3114	5.4828 \pm 0.16
150	0.5740	0.5900	0.5610	0.5750 \pm 0.01	6.8852	6.8820	6.8878	6.8850 \pm 0.00
180	0.5810	0.6040	0.5650	0.5833 \pm 0.02	6.8838	6.8792	6.8870	6.8833 \pm 0.00
210	0.5920	0.5900	0.5610	0.5810 \pm 0.02	6.8816	6.8820	6.8878	6.8838 \pm 0.00
240	0.5780	0.6050	0.5700	0.5843 \pm 0.02	6.8844	6.8790	6.8860	6.8831 \pm 0.00
270	0.6030	0.5950	0.5690	0.5890 \pm 0.02	6.8794	6.8810	6.8862	6.8822 \pm 0.00
300	0.5920	0.5900	0.5670	0.5830 \pm 0.01	6.8816	6.8820	6.8866	6.8834 \pm 0.00
330	0.5840	0.5930	0.5660	0.5810 \pm 0.01	6.8832	6.8814	6.8868	6.8838 \pm 0.00
360	0.5760	0.5950	0.5660	0.5790 \pm 0.01	6.8848	6.8810	6.8868	6.8842 \pm 0.00

ตารางที่ ก.6.12 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 $\mu\text{g/l}$)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/g}$ ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	2.5132	2.4406	2.519	2.4909 ± 0.04	0.0974	0.1119	0.0962	0.1018 ± 0.01
60	2.0593	1.9764	1.995	2.0102 ± 0.04	0.1881	0.2047	0.2010	0.1980 ± 0.01
90	1.2681	1.1730	1.3141	1.2517 ± 0.07	0.3464	0.3654	0.3372	0.3497 ± 0.01
120	0.7037	0.7985	0.8004	0.7675 ± 0.06	0.4593	0.4403	0.4399	0.4465 ± 0.01
150	0.2557	0.2641	0.2382	0.2527 ± 0.01	0.5489	0.5472	0.5524	0.5495 ± 0.00
180	0.2808	0.2761	0.2539	0.2703 ± 0.01	0.5438	0.5448	0.5492	0.5459 ± 0.00
210	0.2744	0.2691	0.2613	0.2683 ± 0.01	0.5451	0.5462	0.5477	0.5463 ± 0.00
240	0.2607	0.2798	0.2533	0.2646 ± 0.01	0.5479	0.5440	0.5493	0.5471 ± 0.00
270	0.2522	0.2456	0.2719	0.2566 ± 0.01	0.5496	0.5509	0.5456	0.5487 ± 0.00
300	0.2577	0.2987	0.2434	0.2666 ± 0.03	0.5485	0.5403	0.5513	0.5467 ± 0.01
330	0.2463	0.2593	0.2655	0.2570 ± 0.01	0.5507	0.5481	0.5469	0.5486 ± 0.00
360	0.267	0.2504	0.2778	0.2651 ± 0.01	0.5466	0.5499	0.5444	0.5470 ± 0.00

ก.6.3 น้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม: อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสมระหว่างตะกั่ว กับปรอท เท่ากับ 3.0000 : 0.0088 mg/l

ตารางที่ ก.6.13 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 mg/l)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ^a (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	1.9617	1.9628	1.9661	1.9635 ± 0.00	0.2077	0.2074	0.2068	0.2073 ± 0.00
60	1.4120	1.3304	1.2741	1.3388 ± 0.07	0.3167	0.3339	0.3452	0.3322 ± 0.00
90	0.7138	0.7138	0.7372	0.7216 ± 0.01	0.4572	0.4572	0.4526	0.4557 ± 0.00
120	0.0436	0.0442	0.0449	0.0442 ± 0.00	0.5913	0.5912	0.5910	0.5912 ± 0.00
150	0.0447	0.0433	0.0447	0.0442 ± 0.00	0.5911	0.5913	0.5911	0.5912 ± 0.00
180	0.0444	0.0439	0.0442	0.0442 ± 0.00	0.5912	0.5912	0.5912	0.5912 ± 0.00
210	0.0453	0.0449	0.0450	0.0451 ± 0.00	0.5909	0.5910	0.5910	0.5910 ± 0.00
240	0.0466	0.0460	0.0457	0.0461 ± 0.00	0.5907	0.5908	0.5909	0.5908 ± 0.00
270	0.0471	0.0465	0.0473	0.0470 ± 0.00	0.5906	0.5907	0.5905	0.5906 ± 0.00
300	0.0472	0.0468	0.0469	0.0470 ± 0.00	0.5906	0.5906	0.5906	0.5906 ± 0.00
330	0.0471	0.0486	0.0479	0.0479 ± 0.00	0.5906	0.5903	0.5904	0.5904 ± 0.00
360	0.0487	0.0498	0.0496	0.0494 ± 0.00	0.5903	0.5900	0.5901	0.5901 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.14 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 1.00 mg/l)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	0.6850	0.6640	0.6920	0.6803 ± 0.01	0.0630	0.0672	0.0616	0.0639 ± 0.00
60	0.4390	0.4410	0.5110	0.4637 ± 0.04	0.1122	0.1118	0.0978	0.1073 ± 0.01
90	0.1690	0.1840	0.1760	0.1763 ± 0.01	0.1662	0.1632	0.1648	0.1647 ± 0.00
120	0.0140	0.0130	0.0150	0.0140 ± 0.00	0.1972	0.1974	0.1970	0.1972 ± 0.00
150	0.0150	0.0140	0.0160	0.0150 ± 0.00	0.1970	0.1972	0.1968	0.1970 ± 0.00
180	0.0150	0.0140	0.0170	0.0153 ± 0.00	0.1970	0.1972	0.1966	0.1969 ± 0.00
210	0.0170	0.0160	0.0160	0.0163 ± 0.00	0.1966	0.1968	0.1968	0.1967 ± 0.00
240	0.0150	0.0140	0.0150	0.0147 ± 0.00	0.1970	0.1972	0.1970	0.1971 ± 0.00
270	0.0140	0.0150	0.0180	0.0157 ± 0.00	0.1972	0.1970	0.1964	0.1969 ± 0.00
300	0.0150	0.0150	0.0180	0.0160 ± 0.00	0.1970	0.1970	0.1964	0.1968 ± 0.00
330	0.0150	0.0150	0.0160	0.0153 ± 0.00	0.1970	0.1970	0.1968	0.1969 ± 0.00
360	0.0180	0.0150	0.0160	0.0163 ± 0.00	0.1964	0.1970	0.1968	0.1967 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.15 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 0.30 mg/l)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
30	0.2127	0.2044	0.2108	0.2093 ± 0.00	0.0175	0.0191	0.0178	0.0181 ± 0.00
60	0.1502	0.1497	0.1585	0.1528 ± 0.01	0.0300	0.0301	0.0283	0.0294 ± 0.00
90	0.0878	0.0902	0.0855	0.0878 ± 0.00	0.0424	0.0420	0.0429	0.0424 ± 0.00
120	0.0150	0.0143	0.0127	0.0140 ± 0.00	0.0570	0.0571	0.0575	0.0572 ± 0.00
150	0.0154	0.0161	0.0155	0.0157 ± 0.00	0.0569	0.0568	0.0569	0.0569 ± 0.00
180	0.0149	0.0144	0.0160	0.0151 ± 0.00	0.0570	0.0571	0.0568	0.0570 ± 0.00
210	0.0148	0.0161	0.0139	0.0149 ± 0.00	0.0570	0.0568	0.0572	0.0570 ± 0.00
240	0.0134	0.0144	0.0150	0.0143 ± 0.00	0.0573	0.0571	0.0570	0.0571 ± 0.00
270	0.0165	0.017	0.0152	0.0162 ± 0.00	0.0567	0.0566	0.0570	0.0568 ± 0.00
300	0.0155	0.0167	0.0171	0.0164 ± 0.00	0.0569	0.0567	0.0566	0.0567 ± 0.00
330	0.0141	0.0139	0.0156	0.0145 ± 0.00	0.0572	0.0572	0.0569	0.0571 ± 0.00
360	0.0153	0.0145	0.0168	0.0155 ± 0.00	0.0569	0.0571	0.0566	0.0569 ± 0.00

ตารางที่ ก.6.16 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 88.00 $\mu\text{g/l}$)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	88.0000	88.0000	88.0000	88.0000 \pm 0.00	0	0	0	0 \pm 0.00
30	64.6420	63.8290	64.2280	64.2330 \pm 0.41	4.6716	4.8342	4.7544	4.7534 \pm 0.08
60	47.7540	47.8311	48.8309	48.1387 \pm 0.60	8.0492	8.0338	7.8338	7.9723 \pm 0.12
90	26.4381	26.5630	26.5324	26.5112 \pm 0.07	12.3124	12.2874	12.2935	12.2978 \pm 0.01
120	1.0563	1.0569	1.0572	1.0568 \pm 0.00	17.3887	17.3886	17.3886	17.3886 \pm 0.00
150	1.0557	1.0560	1.0586	1.0568 \pm 0.00	17.3888	17.3888	17.3882	17.3886 \pm 0.00
180	1.0575	1.0565	1.0563	1.0568 \pm 0.00	17.3885	17.3887	17.3887	17.3886 \pm 0.00
210	1.0629	1.0567	1.0543	1.0580 \pm 0.00	17.3874	17.3887	17.3891	17.3884 \pm 0.00
240	1.0567	1.0617	1.0562	1.0582 \pm 0.00	17.3886	17.3877	17.3888	17.3884 \pm 0.00
270	1.0575	1.0547	1.0613	1.0578 \pm 0.00	17.3885	17.3891	17.3877	17.3884 \pm 0.00
300	1.0604	1.0589	1.0578	1.0590 \pm 0.00	17.3879	17.3882	17.3884	17.3882 \pm 0.00
330	1.0597	1.0606	1.0601	1.0601 \pm 0.00	17.3880	17.3879	17.3880	17.3880 \pm 0.00
360	1.0600	1.0589	1.0604	1.0598 \pm 0.00	17.3880	17.3882	17.3879	17.3880 \pm 0.00

ตารางที่ ก.6.17 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 35.00 $\mu\text{g/l}$)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียฯ (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	35.0000	35.0000	35.0000	35.0000 \pm 0.00	0	0	0	0 \pm 0.00
30	24.1560	23.9730	24.0150	24.0480 \pm 0.10	2.1688	2.2054	2.1970	2.1904 \pm 0.02
60	17.2320	16.8410	16.5520	16.8750 \pm 0.34	3.5536	3.6318	3.6896	3.6250 \pm 0.07
90	8.4430	7.5020	8.2200	8.0550 \pm 0.49	5.3114	5.4996	5.3560	5.3890 \pm 0.10
120	0.4020	0.3560	0.3470	0.3683 \pm 0.03	6.9196	6.9288	6.9306	6.9263 \pm 0.01
150	0.4020	0.3570	0.3470	0.3687 \pm 0.03	6.9196	6.9286	6.9306	6.9263 \pm 0.01
180	0.4100	0.3560	0.3490	0.3717 \pm 0.03	6.9180	6.9288	6.9302	6.9257 \pm 0.01
210	0.4100	0.3910	0.3510	0.3840 \pm 0.03	6.9180	6.9218	6.9298	6.9232 \pm 0.01
240	0.4050	0.3820	0.3560	0.3810 \pm 0.02	6.9190	6.9236	6.9288	6.9238 \pm 0.00
270	0.4130	0.3890	0.3540	0.3853 \pm 0.03	6.9174	6.9222	6.9292	6.9229 \pm 0.01
300	0.4020	0.3600	0.3500	0.3707 \pm 0.03	6.9196	6.9280	6.9300	6.9259 \pm 0.01
330	0.4090	0.3570	0.3500	0.3720 \pm 0.03	6.9182	6.9286	6.9300	6.9256 \pm 0.01
360	0.4130	0.3600	0.3520	0.3750 \pm 0.03	6.9174	6.9280	6.9296	6.9250 \pm 0.01

ตารางที่ ก.6.18 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (ปริมาณปรอทเริ่มต้น เท่ากับ 3.00 $\mu\text{g/l}$)

เวลาในการกวน (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g ไคโตซาน)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000 \pm 0.00	0	0	0	0 \pm 0.00
30	2.2680	2.2756	2.0810	2.2082 \pm 0.11	0.1464	0.1449	0.1838	0.1584 \pm 0.02
60	1.5053	1.5842	1.4676	1.5190 \pm 0.06	0.2989	0.2832	0.3065	0.2962 \pm 0.01
90	0.7235	0.7121	0.7369	0.7242 \pm 0.01	0.4553	0.4576	0.4526	0.4552 \pm 0.00
120	0.2355	0.2407	0.2365	0.2376 \pm 0.00	0.5529	0.5519	0.5527	0.5525 \pm 0.00
150	0.2409	0.2368	0.2411	0.2396 \pm 0.00	0.5518	0.5526	0.5518	0.5521 \pm 0.00
180	0.2462	0.2372	0.2408	0.2414 \pm 0.00	0.5508	0.5526	0.5518	0.5517 \pm 0.00
210	0.2397	0.2413	0.2501	0.2437 \pm 0.01	0.5521	0.5517	0.5500	0.5513 \pm 0.00
240	0.2407	0.2396	0.2382	0.2395 \pm 0.00	0.5519	0.5521	0.5524	0.5521 \pm 0.00
270	0.2377	0.2409	0.2416	0.2401 \pm 0.00	0.5525	0.5518	0.5517	0.5520 \pm 0.00
300	0.2357	0.2311	0.2550	0.2406 \pm 0.01	0.5529	0.5538	0.5490	0.5519 \pm 0.00
330	0.2410	0.2348	0.2466	0.2408 \pm 0.01	0.5518	0.5530	0.5507	0.5518 \pm 0.00
360	0.237	0.2405	0.2393	0.2389 \pm 0.00	0.5526	0.5519	0.5521	0.5522 \pm 0.00

ก.7 ค่า COD, BOD และ TSS หลังตกตะกอนด้วยเกลือโคโคซาน

ก.7.1 ค่า COD

ตารางที่ ก.7.1 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

วันที่	COD _{inf} (mg/l)	COD _{eff} (mg/l)				การลดลงของ COD (mg/g โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
21 มี.ค. 2546	546.15	83.46	80.69	81.52	81.89 ± 1.42	85.34	93.09	92.93	90.45 ± 4.43	85.01 ± 0.26
30 เม.ย. 2546	974.74	115.15	110.93	112.01	112.70 ± 2.19	171.92	172.76	172.55	172.41 ± 0.44	88.44 ± 0.26
7 ก.ค. 2546	783.60	97.24	95.16	98.79	97.06 ± 1.82	137.27	137.69	136.96	137.31 ± 0.37	87.62 ± 0.24
8 ส.ค. 2546	398.59	70.63	72.34	68.80	70.59 ± 1.77	65.59	65.25	65.96	65.90 ± 0.36	82.29 ± 0.45

ก.7.2 ค่า BOD

ตารางที่ ก.7.2 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

ครั้งที่	BOD _{inf} (mg/l)	BOD _{eff} (mg/l)				การลดลงของ BOD (mg/g โคโคซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
21 มี.ค. 2546	71.94	8.89	9.12	9.31	9.11 ± 0.21	12.61	12.56	12.53	12.57 ± 0.04	87.34 ± 0.29
30 เม.ย. 2546	219.37	18.16	17.89	16.54	17.53 ± 0.87	40.24	40.30	40.57	40.37 ± 0.16	92.07 ± 0.40
7 ก.ค. 2546	117.62	11.12	12.03	11.61	11.59 ± 0.46	21.30	21.12	21.20	21.21 ± 0.09	90.15 ± 0.39
8 ส.ค. 2546	60.11	8.06	7.93	7.88	7.96 ± 0.09	10.41	10.44	10.45	10.43 ± 0.02	86.77 ± 0.15

ก.7.3 ค่า TSS

ตารางที่ ก.7.3 การลดลงของค่า TSS ในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

ครั้งที่	TSS _{inf} (mg/l)	TSS _{eff} (mg/l)				การลดลงของ TSS (mg/g ไคโตซาน)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
21 มี.ค. 2546	43.50	7.25	7.25	7.00	7.17 ± 0.14	7.25	7.25	7.30	7.27 ± 0.03	83.52 ± 0.33
30 เม.ย. 2546	80.50	11.00	10.05	10.25	10.58 ± 0.38	13.90	14.00	14.05	13.98 ± 0.08	86.86 ± 0.47
7 ก.ค. 2546	74.50	10.00	10.25	10.25	10.17 ± 0.14	12.90	12.85	12.85	12.87 ± 0.03	86.35 ± 0.20
8 ส.ค. 2546	48.00	7.00	7.50	7.00	7.17 ± 0.29	8.20	8.10	8.20	8.17 ± 0.06	85.07 ± 0.60

ก.8 การเสริมฤทธิ์ (Synergism) และการหักล้างฤทธิ์ (Antogonism) ของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ปรอท และตะกั่วผสมปรอท

ก.8.1 น้ำเสียสังเคราะห์โลหะชนิดเดียว

ตารางที่ ก.8.1 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ กัน

ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอนด้วยไลซาน (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.00	0	0	0	0 ± 0.00	0	0	0	0.0000 ± 0.00
0.07	0.0246	0.0248	0.0255	0.0250 ± 0.001	0.0091	0.0090	0.0089	0.0090 ± 0.000
0.10	0.0297	0.0308	0.0312	0.0306 ± 0.001	0.0141	0.0138	0.0138	0.0139 ± 0.000
0.30	0.0683	0.0714	0.0711	0.0703 ± 0.002	0.0463	0.0457	0.0458	0.0459 ± 0.000
0.50	0.0904	0.0915	0.0887	0.0902 ± 0.001	0.0819	0.0817	0.0823	0.0820 ± 0.000
1.00	0.0916	0.0894	0.0909	0.0906 ± 0.001	0.1817	0.1821	0.1818	0.1819 ± 0.000
3.00	0.0965	0.0982	0.0973	0.0973 ± 0.001	0.5807	0.5804	0.5805	0.5805 ± 0.000

ตารางที่ ก.8.2 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้นต่างๆ กัน

ปริมาณปรอทเริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอนด้วยไซซาน ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/l}$)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.00	0	0	0	0 ± 0.00	0	0	0	0.0000 ± 0.00
1.00	0.1006	0.0993	0.0970	0.0990 ± 0.001	0.1799	0.1801	0.1806	0.1806 ± 0.000
3.00	0.1797	0.1776	0.1753	0.1775 ± 0.002	0.5641	0.5645	0.5649	0.5649 ± 0.000
5.00	0.2029	0.2037	0.2004	0.2023 ± 0.002	0.9594	0.9593	0.9599	0.9599 ± 0.000
10.00	0.2070	0.2108	0.2129	0.2102 ± 0.003	1.9586	1.9578	1.9574	1.9574 ± 0.000
50.00	0.9862	0.9906	0.9875	0.9881 ± 0.002	9.8028	9.8019	9.8025	9.8025 ± 0.001
100.00	1.7026	1.7155	1.6748	0.1676 ± 0.021	19.6595	19.6569	19.6650	19.6650 ± 0.004

ก.8.2 น้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม

ตารางที่ ก.8.3 ผลของปรอทต่อการกำจัดตะกั่ว

อัตราส่วนความเข้มข้น ตะกั่วต่อปรอท (mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอนด้วยไคซาน (mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (mg/g)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0 : 0	0	0	0	0 ± 0.000	0	0	0	0 ± 0.00
0.07 : 0.050	0.0128	0.0123	0.0130	0.0127 ± 0.000	0.0114	0.0115	0.0114	0.0115 ± 0.000
0.10 : 0.001	0.0356	0.0362	0.0348	0.0355 ± 0.0001	0.0329	0.0328	0.0330	0.0329 ± 0.001
0.30 : 0.001	0.0411	0.0429	0.0434	0.0425 ± 0.001	0.0518	0.0514	0.0513	0.0515 ± 0.001
0.50 : 0.005	0.0601	0.0591	0.0586	0.0593 ± 0.001	0.0880	0.0882	0.0883	0.0881 ± 0.001
1.10 : 0.003	0.1165	0.1173	0.1191	0.1176 ± 0.001	0.1967	0.1965	0.1962	0.1965 ± 0.001
3.10 : 0.100	0.0435	0.0424	0.0412	0.0424 ± 0.001	0.6113	0.6115	0.6118	0.6115 ± 0.001

ตารางที่ ก.8.4 ผลของตะกั่วต่อการกำจัดปรอท

อัตราส่วนความเข้มข้น ปรอทต่อตะกั่ว (mg/l)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอนด้วยโคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{g/l}$)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0 : 0	0	0	0	0	0	0	0	0 ± 0.00
0.001 : 0.10	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002 ± 0.000	0.20	0.20	0.20	0.20 ± 0.000
0.003 : 1.10	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001 ± 0.000	0.60	0.60	0.60	0.60 ± 0.000
0.005 : 0.50	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001 ± 0.000	1.00	1.00	1.00	1.00 ± 0.000
0.010 : 0.30	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001 ± 0.000	2.00	2.00	2.00	2.00 ± 0.000
0.050 : 0.07	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002 ± 0.000	10.00	10.00	10.00	10.00 ± 0.000
0.100 : 3.10	0.0011	0.0010	0.0008	0.0010 ± 0.000	20.00	20.00	20.00	20.00 ± 0.000

ก.9 การศึกษาการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก

ก.9.1 การวิเคราะห์ระบบการดูดซับโลหะหนัก โดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบสมการการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ตารางที่ ก.9.1 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ กัน

ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น ($\times 10^3$ mg/l)	ปริมาณตะกั่วหลังตกตะกอนด้วยไลซาน ($\times 10^3$ mg/l)				ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ($\times 10^3$ mg/g)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
1	0.0048	0.0027	0.0023	0.0033 ± 0.00	0.9952	0.9973	0.9977	0.9967 ± 0.00
2	0.0053	0.0078	0.0058	0.0063 ± 0.00	1.9947	1.9922	1.9942	1.9937 ± 0.00
3	0.0113	0.0104	0.0121	0.0113 ± 0.00	2.9887	2.9896	2.9879	2.9887 ± 0.00
4	0.0204	0.0208	0.0223	0.0212 ± 0.00	3.9796	3.9792	3.9777	3.9788 ± 0.00
5	0.0369	0.0319	0.0373	0.0354 ± 0.00	4.9631	4.9681	4.9627	4.9646 ± 0.00
6	0.0965	0.0865	0.0979	0.0936 ± 0.00	5.9035	5.9135	5.9021	5.9064 ± 0.00
7	0.4198	0.4203	0.4231	0.4211 ± 0.00	6.5802	6.5797	6.5769	6.5789 ± 0.00
8	1.4511	1.4506	1.5008	1.4675 ± 0.02	6.5489	6.5494	6.4992	6.5325 ± 0.08
9	2.5211	2.3973	2.5029	2.4738 ± 0.07	6.4789	6.6027	6.4971	6.5262 ± 0.07
10	3.6007	3.7049	3.4973	3.6010 ± 0.10	6.3993	6.2951	6.5027	6.3990 ± 0.10
11	4.5003	4.5040	4.4987	4.5010 ± 0.00	6.4997	6.4960	6.5013	6.4990 ± 0.00
12	5.4043	5.4006	5.5010	5.4353 ± 0.06	6.5957	6.5994	6.4990	6.5647 ± 0.06

ตารางที่ ก.9.2 ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้นต่างๆ กัน

ปริมาณปรอทเริ่มต้น ($\times 10^3$ mg/l)	ปริมาณปรอทหลังตกตะกอนด้วยไซซาน ($\times 10^3$ mg/l)				ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับ ($\times 10^3$ mg/l)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0 ± 0.00	0	0	0	0 ± 0.00
1	0.0105	0.0138	0.0112	0.0118 ± 0.00	0.9895	0.9862	0.9888	0.9882 ± 0.00
2	0.0176	0.0229	0.0252	0.0219 ± 0.00	1.9824	1.9771	1.9748	1.9781 ± 0.00
3	0.0451	0.0371	0.0491	0.0438 ± 0.01	2.9549	2.9629	2.9509	2.9562 ± 0.01
4	0.1192	0.1246	0.1124	0.1187 ± 0.01	3.8808	3.8754	3.8876	3.8813 ± 0.01
5	0.4297	0.4318	0.4216	0.4277 ± 0.01	4.5703	4.5682	4.5784	4.5723 ± 0.01
6	1.2047	1.2007	1.2001	1.2018 ± 0.00	4.7953	4.7993	4.7999	4.7982 ± 0.00
7	2.3651	2.1206	2.3833	2.2897 ± 0.15	4.6349	4.8794	4.6167	4.7103 ± 0.15
8	3.3161	3.2281	3.2257	3.2566 ± 0.05	4.6839	4.7719	4.7743	4.7434 ± 0.05
9	4.2301	4.3257	4.2282	4.2613 ± 0.06	4.7699	4.6743	4.7718	4.7387 ± 0.06
10	5.1414	5.4391	5.2453	5.2753 ± 0.15	4.8586	4.5609	4.7547	4.7247 ± 0.15
15	10.1340	10.4365	10.3479	10.3062 ± 0.16	4.8660	4.5635	4.6521	4.6939 ± 0.16
20	15.0370	15.2206	15.4302	15.2291 ± 0.20	4.9630	4.7794	4.5698	4.7707 ± 0.20
25	20.4241	20.1302	20.2319	20.2621 ± 0.15	4.5759	4.8698	4.7681	4.7379 ± 0.15
30	25.3320	25.0202	25.5812	25.3112 ± 0.28	4.6680	4.9798	4.4188	4.6889 ± 0.28

ก.10 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังระหว่างการกวน

ก.10.1 น้ำกลั่น (Blank)

ตารางที่ ก.10.1 ค่าพีเอชของน้ำกลั่น ไม่ปรับค่าพีเอช (Blank)

เวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอช (pH)			
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย
0	6.97	6.96	6.98	6.97±0.01
10	7.08	7.03	7.08	7.06±0.03
20	7.05	7.04	7.03	7.04±0.01
30	7.08	7.05	7.03	7.05±0.03
40	7.05	7.05	7.03	7.04±0.01
50	7.08	7.05	7.04	7.06±0.02
60	7.08	7.05	7.04	7.06±0.02
70	7.06	7.05	7.04	7.05±0.01
80	7.04	7.05	7.04	7.04±0.01
90	7.03	7.05	7.04	7.04±0.01
100	7.05	7.05	7.04	7.05±0.01
110	7.05	7.05	7.04	7.05±0.01
120	7.05	7.07	7.02	7.05±0.03
150	7.05	7.07	7.07	7.06±0.01
180	7.05	7.07	7.07	7.06±0.01
210	7.05	7.07	7.07	7.06±0.01
240	7.05	7.07	7.07	7.06±0.01
270	7.05	7.07	7.07	7.06±0.01
300	7.05	7.03	7.07	7.05±0.02
330	7.05	7.04	7.07	7.05±0.02
360	7.05	7.06	7.07	7.06±0.01

ตารางที่ ก.10.2 ค่าพีเอชของน้ำกลั่นปรับค่าพีเอช เท่ากับ 6

เวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอช (pH)			
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย
0	7.03	7.05	7.03	7.04±0.01
10	7.09	7.04	7.03	7.05±0.03
20	7.26	7.25	7.26	7.26±0.01
30	7.33	7.30	7.28	7.30±0.03
40	7.46	7.44	7.28	7.39±0.10
50	7.53	7.49	7.52	7.51±0.02
60	7.52	7.48	7.45	7.48±0.04
70	7.51	7.46	7.45	7.47±0.03
80	7.52	7.48	7.45	7.48±0.04
90	7.52	7.48	7.49	7.50±0.02
100	7.52	7.47	7.49	7.49±0.03
110	7.52	7.49	7.49	7.50±0.02
120	7.51	7.44	7.47	7.47±0.04
150	7.52	7.48	7.47	7.49±0.03
180	7.51	7.45	7.48	7.48±0.03
210	7.52	7.49	7.48	7.50±0.02
240	7.52	7.48	7.49	7.50±0.05
270	7.51	7.49	7.48	7.49±0.02
300	7.52	7.48	7.48	7.49±0.02
330	7.51	7.49	7.47	7.49±0.02
360	7.53	7.49	7.48	7.50±0.03

ก.10.2 น้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอย

ตารางที่ ก.10.3 ค่าพีเอชของน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยฯ

เวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอช (pH)			
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย
0	7.26	7.19	7.13	7.19 ± 0.07
10	7.39	7.27	7.29	7.32 ± 0.06
20	7.43	7.35	7.19	7.32 ± 0.12
30	7.45	7.32	7.27	7.35 ± 0.09
40	7.48	7.36	7.30	7.38 ± 0.09
50	7.53	7.34	7.43	7.43 ± 0.10
60	7.55	7.41	7.45	7.47 ± 0.07
70	7.63	7.43	7.48	7.51 ± 0.10
80	7.51	7.42	7.43	7.45 ± 0.05
90	7.73	7.62	7.59	7.65 ± 0.07
100	7.80	7.76	7.82	7.79 ± 0.03
110	7.79	7.79	7.80	7.79 ± 0.01
120	7.80	7.78	7.79	7.79 ± 0.01
150	7.81	7.77	7.80	7.79 ± 0.02
180	7.80	7.78	7.83	7.80 ± 0.03
210	7.80	7.74	7.80	7.78 ± 0.03
240	7.81	7.76	7.83	7.80 ± 0.04
270	7.81	7.75	7.83	7.80 ± 0.04
300	7.81	7.75	7.81	7.79 ± 0.03
330	7.81	7.76	7.81	7.79 ± 0.03
360	7.80	7.76	7.80	7.79 ± 0.02

ก.10.3 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

ตารางที่ ก.10.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

เวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอช (pH)			
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย
0	7.25	7.17	7.11	7.18 ± 0.07
10	7.33	7.24	7.27	7.28 ± 0.05
20	7.42	7.28	7.33	7.34 ± 0.07
30	7.56	7.34	7.38	7.43 ± 0.12
40	7.49	7.43	7.53	7.48 ± 0.05
50	7.64	7.60	7.57	7.60 ± 0.04
60	7.70	7.63	7.60	7.64 ± 0.05
70	7.68	7.63	7.60	7.64 ± 0.05
80	7.70	7.62	7.60	7.64 ± 0.06
90	7.70	7.63	7.58	7.64 ± 0.06
100	7.69	7.63	7.59	7.64 ± 0.05
110	7.70	7.62	7.59	7.64 ± 0.06
120	7.69	7.61	7.60	7.63 ± 0.05
150	7.69	7.63	7.59	7.64 ± 0.05
180	7.68	7.61	7.58	7.62 ± 0.05
210	7.70	7.60	7.60	7.63 ± 0.06
240	7.69	7.61	7.58	7.63 ± 0.06
270	7.70	7.60	7.59	7.63 ± 0.06
300	7.69	7.63	7.60	7.64 ± 0.05
330	7.69	7.60	7.59	7.63 ± 0.06
360	7.70	7.63	7.58	7.64 ± 0.06

ก.10.4 น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

ตารางที่ ก.10.5 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

เวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอช (pH)			
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย
0	7.17	7.02	6.87	7.02 ± 0.15
10	7.19	7.08	7.00	7.09 ± 0.10
20	7.23	7.12	7.11	7.15 ± 0.07
30	7.27	7.17	7.13	7.19 ± 0.07
40	7.30	7.20	7.23	7.24 ± 0.05
50	7.41	7.31	7.26	7.33 ± 0.08
60	7.37	7.32	7.30	7.33 ± 0.04
70	7.49	7.32	7.33	7.38 ± 0.10
80	7.51	7.32	7.34	7.39 ± 0.10
90	7.51	7.33	7.35	7.42 ± 0.08
100	7.54	7.41	7.37	7.44 ± 0.09
110	7.54	7.45	7.44	7.48 ± 0.06
120	7.55	7.45	7.46	7.49 ± 0.06
150	7.64	7.58	7.58	7.60 ± 0.03
180	7.72	7.60	7.67	7.66 ± 0.06
210	7.75	7.62	7.70	7.69 ± 0.07
240	7.73	7.61	7.70	7.68 ± 0.06
270	7.75	7.61	7.69	7.68 ± 0.07
300	7.75	7.60	7.69	7.68 ± 0.08
330	7.75	7.61	7.68	7.68 ± 0.07
360	7.73	7.61	7.69	7.68 ± 0.06

ก.10.5 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท

ตารางที่ ก.10.6 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วผสมปรอท

เวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอช (pH)			
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย
0	7.20	7.05	6.94	7.06 ± 0.13
10	7.24	7.11	7.04	7.13 ± 0.10
20	7.32	7.26	7.11	7.23 ± 0.11
30	7.37	7.31	7.15	7.28 ± 0.11
40	7.42	7.25	7.11	7.26 ± 0.16
50	7.51	7.31	7.26	7.36 ± 0.13
60	7.54	7.31	7.30	7.38 ± 0.14
70	7.59	7.33	7.33	7.42 ± 0.15
80	7.60	7.43	7.31	7.45 ± 0.15
90	7.61	7.43	7.46	7.50 ± 0.10
100	7.63	7.47	7.45	7.52 ± 0.10
110	7.70	7.57	7.58	7.60 ± 0.10
120	7.69	7.58	7.58	7.62 ± 0.06
150	7.69	7.61	7.60	7.63 ± 0.05
180	7.68	7.60	7.58	7.62 ± 0.05
210	7.69	7.61	7.57	7.62 ± 0.06
240	7.70	7.60	7.56	7.62 ± 0.07
270	7.71	7.62	7.59	7.64 ± 0.06
300	7.69	7.60	7.57	7.62 ± 0.06
330	7.70	7.61	7.57	7.63 ± 0.07
360	7.69	7.62	7.60	7.64 ± 0.05

ก.11 การศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปโลหะหนัก

ก.11.1 อุณหภูมิการบ่ม 37 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.11.1 ปริมาณตะกั่วในเซลล์จุลินทรีย์ (ปริมาณตะกั่วในตะกอนโคโคซานเริ่มต้น 3.0000 mg/l)

สัปดาห์ที่	ตะกั่วในตะกอน โคโคซาน (mg/l)				ตะกั่วในตะกอน โคโคซาน (mg/g ตะกอน)	ตะกั่วในเซลล์จุลินทรีย์ (mg/l)				ตะกั่วในเซลล์จุลินทรีย์ (mg/g ตะกอน)
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
0	2.9976	2.9875	2.9377	2.9743 ± 0.03	0.5949 ± 0.01	0.0024	0.0125	0.0623	0.0257 ± 0.03	0.0051 ± 0.01
1	2.6290	2.5383	2.5835	2.5836 ± 0.05	0.5167 ± 0.01	0.3710	0.4617	0.4165	0.4164 ± 0.05	0.0833 ± 0.01
2	1.7922	1.8519	1.8463	1.8301 ± 0.03	0.3660 ± 0.01	1.2078	1.1481	1.1537	1.1699 ± 0.03	0.2340 ± 0.01
3	1.4629	1.4528	1.4782	1.4646 ± 0.29	0.2929 ± 0.00	1.5371	1.5472	1.5218	1.5354 ± 0.01	0.3071 ± 0.00
4	0.9797	0.8793	0.8867	0.9152 ± 0.18	0.1830 ± 0.01	2.0203	2.1207	2.1133	2.0848 ± 0.06	0.4170 ± 0.01
5	0.4965	0.4744	0.4488	0.4732 ± 0.09	0.0946 ± 0.00	2.5035	2.5256	2.5512	2.5268 ± 0.02	0.5054 ± 0.00
6	0.1595	0.1844	0.1276	0.1572 ± 0.03	0.0314 ± 0.01	2.8405	2.8156	2.8724	2.8428 ± 0.03	0.5686 ± 0.01
7	0.1364	0.1548	0.1336	0.1416 ± 0.03	0.0283 ± 0.00	2.8636	2.8452	2.8664	2.8584 ± 0.01	0.5717 ± 0.00
8	0.1668	0.1489	0.1318	0.1492 ± 0.03	0.0298 ± 0.00	2.8332	2.8511	2.8682	2.8508 ± 0.02	0.5702 ± 0.00

ตารางที่ ก.11.2 ปริมาณปรอทในเซลล์จุลินทรีย์ (ปริมาณปรอทในตะกอนโคลิโดซานเริ่มต้น 88.1000 $\mu\text{g/l}$)

สัปดาห์ที่	ปรอทในตะกอนโคลิโดซาน ($\mu\text{g/l}$)				ปรอทในตะกอนโคลิโดซาน ($\mu\text{g/g}$ ตะกอน)	ปรอทในเซลล์จุลินทรีย์ ($\mu\text{g/l}$)				ปรอทในเซลล์จุลินทรีย์ ($\mu\text{g/g}$ ตะกอน)
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
0	79.6269	79.6280	79.5569	79.6039 \pm 0.04	15.9208 \pm 0.01	8.3731	8.3720	8.4431	8.3961 \pm 0.04	0.6792 \pm 0.01
1	54.9090	55.0861	57.8907	55.9619 \pm 1.67	11.1924 \pm 0.33	33.0910	32.9193	30.1093	32.0381 \pm 1.67	5.4076 \pm 0.33
2	38.8431	39.8770	38.7601	39.1601 \pm 0.62	7.8320 \pm 0.12	49.1569	48.1230	49.2399	48.8399 \pm 0.62	8.7680 \pm 0.12
3	25.4678	25.2654	25.7267	25.4866 \pm 0.23	5.0973 \pm 0.05	62.5322	62.7346	62.2733	62.5134 \pm 0.23	11.5027 \pm 0.05
4	1.9971	2.0165	2.0539	2.0225 \pm 0.03	0.4045 \pm 0.01	86.0029	85.9835	85.9461	85.9775 \pm 0.03	16.1955 \pm 0.01
5	2.2611	2.2934	2.2720	2.2755 \pm 0.02	0.4551 \pm 0.00	85.7389	85.7066	85.7280	85.7245 \pm 0.02	16.1449 \pm 0.00
6	2.3075	2.3143	2.3094	2.3104 \pm 0.00	0.4621 \pm 0.00	85.6925	85.6857	85.6906	85.6896 \pm 0.00	16.1379 \pm 0.00
7	2.1507	2.1308	2.1260	2.1358 \pm 0.01	0.4272 \pm 0.00	85.8493	85.8692	85.8740	85.8642 \pm 0.01	16.1728 \pm 0.00
8	2.0977	2.1011	2.0528	2.0839 \pm 0.03	0.4168 \pm 0.01	85.9023	85.8989	85.8472	85.9161 \pm 0.03	16.1832 \pm 0.01

ก.11.2 อุณหภูมิการบ่ม 55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.11.3 ปริมาณตะกั่วในเซลล์จุลินทรีย์ (ปริมาณตะกั่วในตะกอนไคโตซานเริ่มต้น 3.0000 mg/l)

สัปดาห์ที่	ตะกั่วในตะกอน ไคโตซาน (mg/l)				ตะกั่วในตะกอน ไคโตซาน (mg/g ตะกอน)	ตะกั่วในเซลล์จุลินทรีย์ (mg/l)				ตะกั่วในเซลล์จุลินทรีย์ (mg/g ตะกอน)
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
0	2.9836	2.9863	2.9318	2.9672 ± 0.03	0.5934 ± 0.01	0.0164	0.0137	0.0682	0.0328 ± 0.03	0.0066 ± 0.01
1	2.7797	2.7953	2.7666	2.7805 ± 0.01	0.5561 ± 0.00	0.2203	0.2047	0.2334	0.2195 ± 0.01	0.0439 ± 0.00
2	2.3371	2.3650	2.3619	2.3547 ± 0.02	0.4709 ± 0.00	0.6629	0.6350	0.6381	0.6453 ± 0.02	0.1291 ± 0.00
3	1.9020	2.0325	1.9016	1.9454 ± 0.08	0.3891 ± 0.02	1.0980	0.9675	1.0984	1.0546 ± 0.08	0.2109 ± 0.02
4	1.5795	1.6738	1.5858	1.6130 ± 0.05	0.3226 ± 0.01	1.4205	1.3262	1.4142	1.3870 ± 0.05	0.2774 ± 0.01
5	1.3671	1.0730	0.9983	1.1461 ± 0.19	0.2292 ± 0.04	1.6329	1.9270	2.0017	1.8539 ± 0.19	0.3708 ± 0.04
6	0.9718	0.9897	0.9265	0.9627 ± 0.03	0.1925 ± 0.01	2.0282	2.0103	2.0735	2.0373 ± 0.03	0.4075 ± 0.01
7	0.7138	0.7290	0.7076	0.7168 ± 0.01	0.1434 ± 0.00	2.2862	2.2710	2.2924	2.2832 ± 0.01	0.4566 ± 0.00
8	0.7247	0.7352	0.7241	0.7280 ± 0.01	0.1456 ± 0.00	2.2753	2.2648	2.2759	2.2720 ± 0.01	0.4544 ± 0.00

ตารางที่ ก.11.4 ปริมาณปรอทในเซลล์จุลินทรีย์ (ปริมาณปรอทในตะกอนโคโคซานเริ่มต้น 88.1000 $\mu\text{g/l}$)

ลำดับ ที่	ปรอทที่อยู่ในตะกอน โคโคซาน ($\mu\text{g/l}$)				ปรอทที่อยู่ในตะกอน โคโคซาน ($\mu\text{g/g}$ ตะกอน)	ปรอทในเซลล์จุลินทรีย์ ($\mu\text{g/l}$)				ปรอทในเซลล์จุลินทรีย์ ($\mu\text{g/g}$ ตะกอน)
	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
0	79.7997	79.7390	79.6014	79.7134 \pm 0.10	15.9427 \pm 0.02	8.2003	8.2610	8.3986	8.2866 \pm 0.10	0.3573 \pm 0.02
1	61.0120	62.9064	61.9108	61.9431 \pm 0.95	12.3886 \pm 0.19	26.9880	25.0936	26.0892	26.0569 \pm 0.95	3.9114 \pm 0.19
2	52.4510	53.6207	52.6001	52.8906 \pm 0.64	10.5781 \pm 0.13	35.5490	34.3793	35.3999	35.1094 \pm 0.64	5.7219 \pm 0.13
3	37.0102	38.9509	37.1005	37.6872 \pm 1.10	7.5374 \pm 0.22	50.9898	49.0491	50.8995	50.3128 \pm 1.10	8.7626 \pm 0.22
4	26.8063	27.3987	26.7361	26.9804 \pm 0.36	5.3961 \pm 0.07	61.1937	60.6013	61.2639	61.0196 \pm 0.36	10.9039 \pm 0.07
5	13.4038	14.4963	13.2970	13.7324 \pm 0.66	2.7465 \pm 0.13	74.5962	73.5037	74.7030	74.2676 \pm 0.66	13.5535 \pm 0.13
6	5.8361	5.7460	5.7689	5.7837 \pm 0.05	1.1567 \pm 0.01	82.1639	82.2540	82.2311	82.2163 \pm 0.05	15.1433 \pm 0.01
7	6.1723	6.0007	6.3992	6.1907 \pm 0.20	1.2381 \pm 0.04	81.8277	81.9993	81.6008	81.8093 \pm 0.20	15.0619 \pm 0.04
8	5.8832	6.1079	6.4027	6.1313 \pm 0.26	1.2263 \pm 0.05	82.1168	81.8921	81.5973	81.8687 \pm 0.26	15.0737 \pm 0.05

ก.12 การจำแนกสายพันธุ์แบคทีเรียที่มีอยู่ในตะกอน

ตารางที่ ก.12.1 จำนวนแบคทีเรียที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อ	จำนวนแบคทีเรีย (*10 ⁶ CFU/g ไคโตซาน)				
	0	2	4	6	8
NA	74	2560	2460	170	10
NA+Pb	1.63	430	385	140	6
NA+Pb/2	1.79	620	594	8	7
NA+Hg	2.16	970	851	6	2
NA+Hg/2	3.18	1240	1190	9	2
NA+Pb+Hg	4.46	1590	1260	9	8

หมายเหตุ

NA: อาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็ง

NA+Pb: อาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมตะกั่วที่ความเข้มข้น 3.0000 มก/ล

NA+Pb/2: อาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมตะกั่วที่ความเข้มข้น 1.5000 มก/ล

NA+Hg: อาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมปรอทที่ความเข้มข้น 0.0080 มก/ล

NA+Hg/2: อาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมตะกั่วที่ความเข้มข้น 0.0040 มก/ล

NA+Pb+Hg: อาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผสมตะกั่วและปรอทที่ความเข้มข้น 3.0000 และ 0.0080 มก/ล

ก.12.2 การจัดจำแนกเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกได้

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จำนวนเชื้อ และ รูปร่างเซลล์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกเมื่อเลี้ยงใน NA, NA+Pb ที่ความเข้มข้น 3.00 และ 1.50 มก/ล, NA+Hg ที่ความเข้มข้น 0.008 และ 0.004 มก/ล และ NA+Pb+Hg ที่ความเข้มข้น 3.00 และ 0.008 มก/ล ตามลำดับในแต่ละสัปดาห์มีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ ก.12.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จำนวนเชื้อ และ รูปร่างเซลล์ในแต่ละสัปดาห์

สัปดาห์	ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรีย (CFU/g chitosan)	ลักษณะ โคลิ	แกรม	รูปร่างเซลล์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์
0	NA	7.4×10^7	โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคโลนีสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb	1.63×10^6	โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
	NA+Pb/2	1.79×10^6	โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
	NA+Hg	2.19×10^6	โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
	NA+Hg/2	3.81×10^6	โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคโลนีสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb+Hg	4.46×10^6	โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคโลนีสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคโลนีสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว

ตารางที่ ก.12.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จำนวนเชื้อ และ รูปร่างเซลล์ในแต่ละสัปดาห์ (ต่อ)

สัปดาห์	ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรีย (CFU/g chitosan)	ลักษณะ โคลิ	แกรม	รูปร่างเซลล์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์
2	NA	2.56×10^6	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb	4.3×10^8	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb/2	6.2×10^6	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Hg	9.7×10^8	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Hg/2	1.24×10^9	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb+Hg	1.59×10^9	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว

ตารางที่ ก.12.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จำนวนเชื้อ และ รูปร่างเซลล์ในแต่ละสัปดาห์ (ต่อ)

สัปดาห์	ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรีย (CFU/g chitosan)	ลักษณะ โคลิ	แกรม	รูปร่างเซลล์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์
4	NA	3.18×10^9	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb	3.85×10^8	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb/2	5.94×10^8	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Hg	8.51×10^8	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเป็นหยัก ขนาดใหญ่ ผิวด้าน	+	เซลล์รูปแท่งการกระจายตัว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Hg/2	1.19×10^9	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว
	NA+Pb+Hg	1.26×10^9	โคลิสีขาวขุ่น ขอบเรียบ ผิวมันวาว	+	เซลล์รูปแท่งมี spore อยู่ตรงกลางเซลล์ และเซลล์เรียงต่อกันเป็นสายยาว ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
			โคลิสีขาวขนาดเล็กขุ่นมันวาว	-	เซลล์รูปแท่งกระจายตัว

ตารางที่ ก.12.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จำนวนเชื้อ และ รูปร่างเซลล์ในแต่ละสัปดาห์ (ต่อ)

สัปดาห์	ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรีย (CFU/g chitosan)	ลักษณะ โคลิ	แกรม	รูปร่างเซลล์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์
6	NA	1.7×10^7	โคลิสีขาวขุ่น ผิวด้าน	+	เซลล์ทรงกลม ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
	NA+Pb	1.4×10^6			
	NA+Pb/2	8.0×10^6			
	NA+Hg	6.0×10^6			
	NA+Hg/2	9.0×10^6			
	NA+Pb+Hg	9.0×10^6			
8	NA	1.0×10^7	โคลิสีขาวขุ่น ผิวด้าน	+	เซลล์ทรงกลม ทดสอบ catalase ได้ผลบวก
	NA+Pb	6.0×10^6			
	NA+Pb/2	7.0×10^6			
	NA+Hg	2.0×10^6			
	NA+Hg/2	2.0×10^6			
	NA+Pb+Hg	8.0×10^6			

ตารางที่ ก.12.3 รายละเอียดการตรวจวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas fluorescens*

รายละเอียด	ผลการทดสอบ
Gram reaction	-ve
Reduction of nitrate	-
Indole production of tryptophane	+
Fermentative production of acid from glucose	-
Arginine dihydrolase	-
Urease production	-
Hydrolysis of esculin	-
Hydrolysis of gelatin	+
β -galactosidase production (p-nitro-phnyl- β -D-galactopyranoside)	-
Assimilation of:	
- Glucose	+
- Arabinose	-
- Mannose	+
- Mannitol	+
- N-acetyl-glucosamine	+
- Maltose	-
- Gluconate	+
- Caprate	+
- Adipate	-
- Malate	+
- Citrate	+
- Phenyl-acetate	-
Cytochrome oxidase	+

ตารางที่ ก.12.4 รายละเอียดการตรวจวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย *Acinetobacter sp.*

รายละเอียด	ผลการทดสอบ
Gram reaction	-ve
Reduction of nitrate	-
Indole production of tryptophane	-
Fermentative production of acid from glucose	-
Arginine dihydrolase	-
Urease production	-
Hydrolysis of esculin	-
Hydrolysis of gelatin	-
β -galactosidase production (p-nitro-phnyl- β -D-galactopyranoside)	-
Assimilation of:	
- Glucose	-
- Arabinose	-
- Mannose	-
- Mannitol	-
- N-acetyl-glucosamine	-
- Maltose	-
- Gluconate	-
- Caprate	+
- Adipate	-
- Malate	+
- Citrate	+
- Phenyl-acetate	-
Cytochrome oxidase	-

หมายเหตุ:

-ve = Gram negative bacteria

+ = Positive reaction

- = Negative reaction

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ข.1 การวิเคราะห์ COD (Chemical Oxygen Demand)

1. เครื่องมือ

1.1 ชุดกลั่นไพลกลับ (Reflux apparatus) ประกอบด้วย ขวดรูปชมพู่กันแบน ขนาด 250-500 มิลลิลิตร

1.2 แผ่นความร้อน (Hot plate)

1.3 บิวเรตต์ (Burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร

2 สารเคมี

2.1 สารละลายมาตรฐาน โพตัสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) 0.25 นอร์แมล: ละลาย Potassium dichromate 12.259 กรัม ซึ่งอบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

2.2 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ที่ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4): ละลาย Ag_2SO_4 22 กรัม ใน กรด H_2SO_4 เข้มข้นตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ละลาย

2.3 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6 H_2O$) 0.1 นอร์แมล: ละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6 H_2O$ 39 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรด H_2SO_4 ลงไป 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนครบปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate ทำได้ดังนี้ นำสารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate 10 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร แล้วเติม conc H_2SO_4 30 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาไทเทรตกับสารละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6 H_2O$ โดยใช้ ferroin จำนวน 2-3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

$$\text{Normality} = \frac{\text{ปริมาณ } K_2Cr_2O_7 \times 0.25}{\text{ปริมาณ } Fe(NH_4)_2(SO_4)_2}$$

2.4 สารละลาย ferroin อินดิเคเตอร์: ละลาย 1-10 Phenanthroline monohydrate ปริมาณ 1.485 กรัม และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3. วิธีการ

3.1 ใส HgSO_4 ประมาณ 0.4 กรัม ลงในขวดรีฟลักซ์พร้อมด้วย glass bead 2-3 เม็ด จากนั้นเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในขวด ปิดสารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นไป เขย่าให้เข้ากัน

3.2 ค่อยๆเติมกรด ซัลฟูริก เข้มข้น ที่ผสม Ag_2SO_4 ลงไป 30 มิลลิลิตร (ไม่ต้องเขย่า)

3.3 นำขวดรีฟลักซ์นี้ไปต่อกับเครื่องควบแน่น ค่อยๆ หมุนขวดให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี ก่อนแล้วจึงทำการรีฟลักซ์หรือต้มให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใช้น้ำกลั่นฉีดล้างเครื่องควบแน่นก่อนที่จะถอดขวดรีฟลักซ์ออกไปไทเทรต

3.4 ทำ blank โดยใช้น้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร และน้ำยาเคมีต่างๆ เหมือนที่ใช้วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง แล้วทำการรีฟลักซ์ไปพร้อมๆ กับน้ำตัวอย่าง

3.5 ไทเทรตหาปริมาณ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่เหลือ หรือมากเกินไปด้วยสารละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ โดยใช้ ferroin เป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด จะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตสีเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

4. การคำนวณ

$$\text{COD (มก./ล.)} = \frac{(a-b) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำเสียดตัวอย่าง}}$$

a คือ ปริมาตรของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรต blank (มล.)

b คือ ปริมาตรของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรตน้ำเสียดตัวอย่าง (มล.)

N คือ นอร์แมลของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้

ข.2 การวิเคราะห์ BOD (Biochemical Oxygen Demand)

ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีเอไซด์โมดิฟิเคชันของวิธีไอโอดิเมตริก (Azide Modification of the Iodometric Method)

1. เครื่องมือ

- 1.1 ขวด BOD ขนาด 300 มิลลิลิตร พร้อมจุกแก้วที่เป็น ground joint
- 1.2 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 1.3 บิวเรตต์
- 1.4 ปิเปตต์
- 1.5 ตู้อบ (Incubator)

2. สารเคมี

- 2.1 สารละลายแมงกานีสซัลเฟต (MnSO_4): ละลาย $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 480 กรัม หรือ $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 364 กรัม ในน้ำกลั่น กรองแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
- 2.2 น้ำยาอัลคาไลด์-ไอโอดด์ (Alkalide-iodide reagent) ละลาย NaOH 500 กรัม (หรือ KOH 700 กรัม) และ NaI 135 กรัม (หรือ KI 150 กรัม) ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร
- 2.3 น้ำยาอัลคาไลด์-ไอโอดด์-เอไซด์ (Alkalide-iodide-azide Reagent): ละลาย NaN_3 10 กรัม ในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วเติมลงในสารละลาย Alkalide-iodide reagent
- 2.4 น้ำแป้ง: ละลายแป้งมันสำปะหลัง 5 กรัมในน้ำต้ม แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ถ้าต้องการเก็บไว้เป็นเวลานานเติม Salicylic acid 1.25 กรัม หรือ toluene 2-3 หยด ต่อน้ำแป้ง 1 ลิตร
- 2.5 สารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 นอร์แมล
- 2.6 สารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต 0.025 นอร์แมล: ละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 6.205 กรัม ในน้ำกลั่นต้มเดือด ทิ้งไว้ให้เย็นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
- 2.7 สารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0.025 นอร์แมล: ละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1.226 กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร
- 2.8 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer): ละลาย KH_2PO_4 8.5 กรัม K_2HPO_4 21.75 กรัม $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 33.4 กรัม และ NH_4Cl 1.7 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี pH ประมาณ 2

2.9 สารละลาย $MgSO_4$: ละลาย $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 22.5 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร

2.10 สารละลาย $CaCl_2$: ละลาย Anhydrous $CaCl_2$ 27.5 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร

2.11 สารละลาย $FeCl_3$: ละลาย $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 0.25 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ $0.025 N Na_2S_2O_3$

ละลาย KI 2 กรัม ในขวดรูปกรวย โดยเติม $I+9 H_2SO_4$ 10 มิลลิลิตร และสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ 0.025 นอร์แมล 20 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืด 5 นาที เติมน้ำกลั่นจนครบ 400 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย $Na_2S_2O_3$ 0.025 นอร์แมล ที่เตรียมไว้ ใช้น้ำแป้งอินดิเคเตอร์ จุดยุติสีน้ำเงินจางหายไป นั่นคือ สารละลายโซเดียมโซอซัลเฟตมีความเข้มข้น 0.025 นอร์แมล

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของ } Na_2S_2O_3 &= \frac{0.025 \times 20}{\text{ปริมาตรของ } Na_2S_2O_3 \text{ ที่ใช้}} \\ &= \frac{\text{ความเข้มข้นของ } K_2Cr_2O_7 (N) \times \text{ปริมาตร } K_2Cr_2O_7 \text{ ที่ใช้}}{\text{ปริมาตรของ } Na_2S_2O_3 \text{ ที่ใช้}} \end{aligned}$$

3. วิธีการ

การเตรียมน้ำสำหรับใช้เจือจาง

นำน้ำกลั่นตวงปริมาตรให้มากกว่าที่ต้องการใช้จริงประมาณ 1 ลิตร เติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์, $FeCl_2$, $MgSO_4$, $CaCl_2$, อย่างละ 1 มิลลิลิตร น้ำเจือจาง 1 ลิตร เติมอากาศให้มีออกซิเจนอิ่มตัวในน้ำควรทำอย่างน้อยประมาณ 1 ชั่วโมงในที่นี้ใช้ตัวอย่างน้ำร้อยละ 0.2 เมื่อได้น้ำตัวอย่างแล้วปฏิบัติดังนี้

3.1 เก็บน้ำตัวอย่างให้เต็มขวด BOD (ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ) อย่างละ 3 ขวด โดยนำมาหา DO_0 1 ขวด และ DO_5 2 ขวด (DO_5 คือนำขวดไปบ่มไว้ที่ตู้บ่มเชื้อ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน)

3.2 เติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 2 มิลลิลิตร ลงใต้ผิวน้ำ

3.3 เติมสารละลายอัลคาไลด์-ไอโอไดด์-เฮไซค์ 2 มิลลิลิตร ลงใต้ผิวน้ำ

3.4 ปล่อยให้ตะกอนนอนกัน

3.5 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร โดยปลายปิเปตอยู่เหนือตัวอย่าง และค่อยๆ ปล่อยให้กรดไหลไปเป็นสายตามคอขวด ปิดจุก แล้วเขย่าจนตะกอนละลายหมด

3.6 ตั้งทิ้งไว้ให้อิโอดีนกระจายไปทั่วขวด แล้วนำตัวอย่างมา 203 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.025 นอร์แมล จนกระทั่งได้สีเหลืองอ่อนๆ เติมน้ำแบ่ง 1-2 มิลลิลิตรเป็นอินดิเคเตอร์ไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป จดปริมาตร

4. การคำนวณ

$$\text{BOD (มก./ล.)} = \frac{(\text{DO}_0 - \text{DO}_5) \times 100}{\% \text{ ที่เจือจาง}}$$

ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณ TSS (Total Suspended Solids)

1. เครื่องมือ

- 1.1 กระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
- 1.2 เครื่องชั่ง (Analytical balance):
- 1.3 เตาอบ (oven)
- 1.4 โถดูดความชื้น (dessicator)
- 1.5 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 1.6 ขวดดูด และกรวยกรอง (Suction flask และ Buchner funnel)

2. วิธีการ

- 2.1 นำกระดาษกรองอบในตู้อบ 100 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เก็บให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 2.2 ทำเครื่องหมายโดยเขียนตัวเลขไว้ที่กระดาษกรองซึ่งให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน (ให้เป็น Wt.1 (มิลลิกรัม)) บันทึกว่าหมายเลขใดใช้กับตัวอย่างใด
- 2.3 นำกระดาษกรองใส่ในกรวยกรอง เลือกปริมาตรน้ำตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแห้งของสารตกค้างอยู่บนกระดาษกรองระหว่าง 10-200 มิลลิกรัม ใช้น้ำตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

ลักษณะของน้ำตัวอย่างในแต่ละวัน) ก่อนกรองควรใช้ก้นฉีดยาให้กระดาษกรองเปียกเพื่อจะได้ติดดีกับกรวยกรอง และเขย่าน้ำตัวอย่างให้เข้ากันดี หลังจากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่าง

2.4 ใช้น้ำกลั่นล้างปิเปตให้ทั่ว

2.5 ใช้ปากคีบค่อยๆ หนีบกระดาษกรองที่ใช้กรองตัวอย่างน้ำแล้ว วางบนภาชนะทนไฟที่เตรียมไว้

2.6 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.7 ปลดปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักรวมของของแข็งทั้งหมด แวนลอยกับน้ำหนักกระดาษกรอง

2.8 ควรทำซ้ำข้อ 6-7 จนได้น้ำหนักคงที่ (ให้เป็น Wt.2 (มิลลิกรัม))

3. การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{TSS (มก./ล.)} &= \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (มก.)} \times 1000}{\text{ปริมาตรน้ำเสียดตัวอย่าง}} \\ &= \frac{(Wt.2 - Wt.1) \text{ (มก.)} \times 1000}{\text{ปริมาตรน้ำเสียดตัวอย่าง}} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพ (%) ในการลดค่า COD, BOD และ TSS

$$\text{ประสิทธิภาพการลดค่า COD (\%)} = \frac{\text{COD}_{\text{inf}} - \text{COD}_{\text{eff}} \times 100}{\text{COD}_{\text{inf}}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการลดค่า BOD (\%)} = \frac{\text{BOD}_{\text{inf}} - \text{BOD}_{\text{eff}} \times 100}{\text{BOD}_{\text{inf}}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการลดค่า TSS (\%)} = \frac{\text{TSS}_{\text{inf}} - \text{TSS}_{\text{eff}} \times 100}{\text{TSS}_{\text{inf}}}$$

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำ

ค.1 ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

ตารางที่ ค.1 มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน

พารามิเตอร์	หน่วย	การแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์*				
		แหล่งน้ำประเภทที่				
		1	2	3	4	5
1. BOD	มก./ล.	1.5	< 20			-
2. COD	"	-	< 120			-
3. TSS	"	-				
4. pH	-	5-9				
		ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำประเภทที่ 2, 3 และ 4**				
5. Pb	มก./ล.	0.05				
6. Cd	"	0.005 ^a , 0.05 ^b				
7. Cr ⁺⁶	"	0.05				
8. Hg	ไมโครกรัม/ลิตร	0.002				

หมายเหตุ: a = ในน้ำที่มีความกระด้างไม่เกินกว่า 100 มก/ล ในรูป CaCO₃

b = ในน้ำที่มีความกระด้างเกินกว่า 100 มก/ล ในรูป CaCO₃

* การแบ่งประเภทแหล่งน้ำผิวดินซึ่งมีใช้น้ำทะเล

** กำหนดค่ามาตรฐานเฉพาะในแหล่งน้ำ 2-4 สำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 1 ให้ เป็นไปตามธรรมชาติ และแหล่งน้ำประเภทที่ 5 ไม่กำหนด

ประเภทที่ 1 ได้แก่ แหล่งน้ำที่มีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภท และสามารถเป็นประโยชน์ เพื่อ

- การอุปโภค และบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ
- การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน
- การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์วิทยาของแหล่งน้ำ

ประเภทที่ 2 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภค และบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน

- การอนุรักษ์สัตว์น้ำ, การประมง, การว่ายน้ำ และการกีฬา

ประเภทที่ 3 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภค และบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน

- การเกษตร

ประเภทที่ 4 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภค และบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน

- การอุตสาหกรรม

ประเภทที่ 5 แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 ความแรงของกรด และเบส (Strengths of Acids and Bases) (อินทรีฯ วิทยุพนธ์พ. 2545)

ตารางที่ ค.2 ความสัมพันธ์ความแรงของกรด และเบส

Acid	Formula	Conjugate base	Formula
Perchloric	HClO ₄	Perchlorate ions	ClO ₄ ⁻
Hydroiodide	HI	Iodide ions	I ⁻
Hydrochloric	HCl	Chloride ions	Cl ⁻
Nitric	HNO ₃	Nitrate ions	NO ₃ ⁻
Sulfuric	H ₂ SO ₄	Hydrogen sulfate ions	HSO ₄ ⁻
Hydronium ion	H ₃ O ⁺	Water	H ₂ O
Sulfurous	H ₂ SO ₃	Hydrogen sulfite ions	HSO ₃ ⁻
Hydrogen sulfate ions	H ₂ SO ₄ ⁻	Sulfate ions	SO ₄ ²⁻
Phosphoric	H ₃ PO ₄	Dihydrogen phosphate ions	H ₂ PO ₄ ⁻
Hydrofluoric	HF	Fluoric ions	F ⁻
Nitrous	HNO ₂	Nitrite	NO ₂ ⁻
Acetic	HC ₂ H ₃ O ₂	Acetate ions	C ₂ H ₃ O ₂ ⁻
Carbonic	H ₂ CO ₃	Hydrogen carbonate ions	HCO ₃ ⁻
Hydrogen sulfide	H ₂ S	Hydrogen sulphide ions	HS ⁻
Hydrogen sulfite ions	HSO ₃ ⁻	Sulfite ions	SO ₃ ²⁻
Ammonium ions	NH ₄ ⁺	Ammonia	NH ₃
Hydrogen carbonate ions	HCO ₃ ⁻	Carbonate ions	CO ₃ ²⁻
Hydrogen sulfide ions	HS ⁻	Sulfide ions	S ²⁻
Water	H ₂ O	Hydroxide ions	OH ⁻
Hydroxide ions	OH ⁻	Oxide ions	O ²⁻
Ammonia	NH ₃	Amide ions	NH ₂ ⁻
Hydrogen	H ₂	Hydride ions	H ⁻

Decreasing acid strength

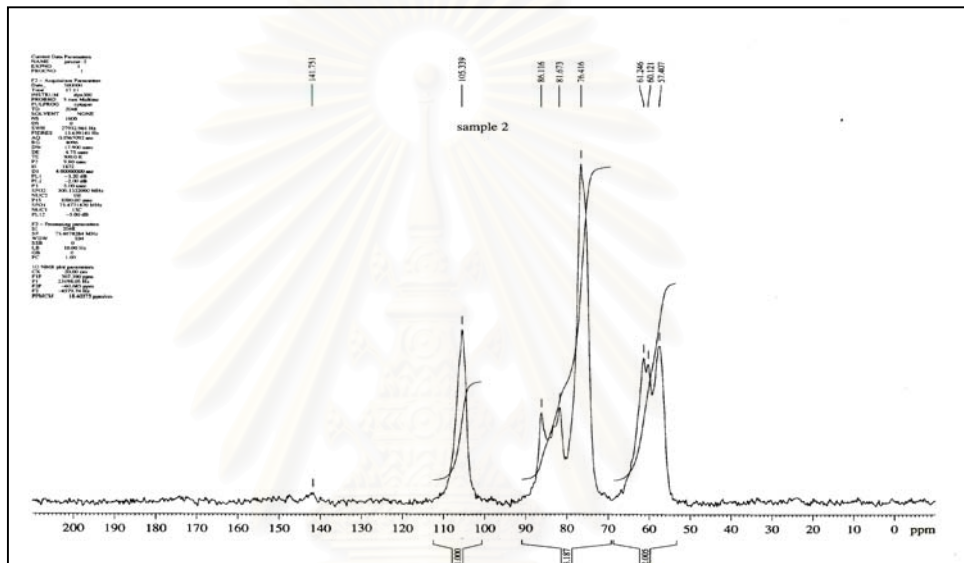
Decreasing base strength

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์สมบัติของไคโตซาน

ง.1 ผลการวิเคราะห์ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล (Degree of Deacetylation)

ง.1.1 วิเคราะห์โดยเครื่อง NMR



ง.1.2 วิเคราะห์โดยวิธีไทเทรต (Titration) (Hayes, 1988)

วิเคราะห์โดยวิธี Colloidal titration (Amino residue analysis) ดังนี้

1. เครื่องมือ

- 1.1 ชุดกรองสุญญากาศ (Suction flask และ Buchner funnel)
- 1.2 ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
- 1.3 ตู้อบ (Incubator)
- 1.4 ฝ้ายพอลิเอสเตอร์

2. สารเคมี

- 2.1 สารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- 2.2 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น
- 2.3 สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก
- 2.4 เมทานอล (Methanol)
- 2.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

3. วิธีการ

- 3.1 ละลายไอโอดีน 2.5 กรัม ในกรดแอสติกความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยกวนเป็นเวลา 15 นาที
- 3.2 กรองสารละลายด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์ ตะกอนที่ไม่ละลายทิ้งไป
- 3.3 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 18 มิลลิลิตรอย่างช้าๆ และกวนอย่างรุนแรงเพื่อให้เกิดตะกอนมากที่สุด
- 3.4 กรองด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์ ส่วนที่เป็นสารละลายใส่นำทิ้งไป
- 3.5 นำตะกอนที่ได้ละลายกับเมทานอล 100 มิลลิลิตร กรองซ้ำอีกครั้ง
- 3.6 นำสารละลายที่กรองได้ทดสอบกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ถ้าเกิดตะกอนสีขาวขุ่นให้นำตะกอนที่กรองได้ไปเติมเมทานอลอีกครั้ง ทดสอบจนกว่าจะไม่เกิดตะกอนขาวจึงค่อยทำขั้นต่อไป
- 3.7 นำตะกอนจากการกรองอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไอโอดีนไฮโดรคลอไรด์
- 3.8 นำไอโอดีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 1 กรัม ละลาย และปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร และแบ่งสารละลายมา 50 มิลลิลิตรไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์
- 3.9 คำนวณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป

4. การคำนวณ

- 4.1 น้ำหนักตัวอย่าง (ไอโอดีนไฮโดรคลอไรด์) _____ กรัม
- 4.2 การไทเทรต
 - สารละลายไอโอดีนไฮโดรคลอไรด์ที่ใช้ 50 มิลลิลิตร

- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ _____ โมลาร์
ใช้ปริมาตร เท่ากับ _____ มิลลิลิตร

4.3 คำนวณ

- ไคโตซานไฮโดรคลอไรด์ 1 โมล (197.61672 กรัม) = สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล
- ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน (NH_2) (กรัม) = (ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ \times ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้) $\times 0.005$
- ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะเซตาตไฮด์ (NHCOCH_3) (กรัม) = ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ - ปริมาณโมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน
- หมู่อะเซตาตไฮด์ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 203.19296 กรัม ดังนั้น ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะเซตาตไฮด์ มีค่าเท่ากับ โมล
- ปริมาณ โมโนเมอร์รวม = ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน + ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะเซตาตไฮด์
- ระดับการกำจัดหมู่อะเซติล = (ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน / ปริมาณโมโนเมอร์รวม) $\times 100$

5. ตัวอย่างการคำนวณ

5.1 น้ำหนักตัวอย่าง (ไคโตซานไฮโดรคลอไรด์) 1.03 กรัม

5.2 การไทเทรต

- สารละลายไคโตซานไฮโดรคลอไรด์ที่ใช้ 50 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1059 โมลาร์
ใช้ปริมาตร เท่ากับ 8.63 มิลลิลิตร
- ไคโตซานไฮโดรคลอไรด์ 1 โมล (197.61672 กรัม) = สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล
- ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน (NH_2) (โมล) = (ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ \times ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้) $\times 0.005 =$
 4.57×10^{-3} โมล = 0.903 กรัม
- ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะเซตาตไฮด์ (NHCOCH_3) (กรัม) = ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ - ปริมาณโมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน = 0.127 กรัม

- หมู่อะเซตาติไฮด์ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 203.19296 กรัม ดังนั้นปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะเซตาติไฮด์ มีค่าเท่ากับ 6.25×10^{-4} โมล
- ปริมาณ โมโนเมอร์รวม = ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน + ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะเซตาติไฮด์ = 5.20×10^{-3}
- ระดับการกำจัดหมู่อะเซติล = (ปริมาณ โมโนเมอร์ที่มีหมู่อะมิโน / ปริมาณโมโนเมอร์รวม) $\times 100 = 87.88 \%$

ง.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ด้วยเครื่อง GPC

เอกสารแนบที่ 2

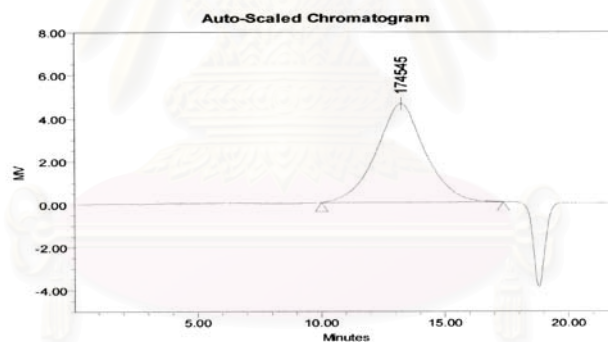
Sample Name: Sample 2

Date Acquired: 28/11/2002 14:47:47

Page: 1 of 1

SAMPLE INFORMATION

Sample Name:	Sample 2	Acquired By:	TEMSIRI
Sample Type:	Broad Unknown	Date Acquired:	28/11/2002 14:47:47
Vial:	10	Acq. Method Set:	GPC_linear
Injection #:	1	Date Processed:	28/11/2002 16:39:42
Injection Volume:	20.00 ul	Processing Method:	Meth_F06_acetatebuf_linear7
Run Time:	22.0 Minutes	Channel Name:	410
Sample Set Name:		Proc. Chnl. Descr.:	



GPC Results

	Name	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	Broad	75787	350859	174545	1276241	2854528	4.629530

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจรรรัตน์ เชาว์เลิศ เกิดวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดภูเก็ต จบการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เมื่อปี พ.ศ. 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
(สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย