

ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย



นางสาวเอมมา อาสนจินดา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2118-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CHELATING AGENTS ON LEAD ADSORPTION
FROM AQUEOUS SOLUTION BY CROSS-LINKED CHITOSAN



Miss. Emma Asnachinda

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2118-8

เอมม่า อาสนจินดา : ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบ
โครงร่างตาข่าย (EFFECTS OF CHELATING AGENTS ON LEAD ADSORPTION FROM
AQUEOUS SOLUTION BY CROSS-LINKED CHITOSAN) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุภา
ชาวเขียว, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา, 123 หน้า. ISBN 974-17-2118-8

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซน
แบบโครงร่างตาข่ายโดยการทดลองแบบแบตซ์และคอลัมน์ ซึ่งการทดลองแบบแบตซ์ได้ทำการศึกษา
ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับตะกั่ว เมื่อมีการแปรค่าพีเอช ความเข้มข้นของ
สารละลายตะกั่ว และความเข้มข้นของสารคีเลตอันได้แก่ อีดีทีเอ เอ็นทีเอ และกรดทาทาริก ส่วนการ
ทดลองแบบคอลัมน์ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว และปริมาณน้ำเสียที่กำจัดได้ให้อยู่ใน
มาตรฐานน้ำทิ้งของตะกั่วคือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองในแบตซ์พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่าง
ตาข่ายสูงขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้น ในช่วงพีเอชที่ทำการศึกษา และการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย
ตะกั่วทำให้ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อปริมาณไคโตแซนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับผลการศึกษาผล
ของสารคีเลต พบว่าเมื่อเติมอีดีทีเอและเอ็นทีเอลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้ความสามารถในการ
ดูดซับด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอชสูงลดลง ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่
พีเอชต่ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปประจุลบ จึงทำให้เกิดการดูดซับกับ
ไคโตแซนที่พีเอชต่ำซึ่งอยู่ในรูปประจุบวกได้ดีกว่า ส่วนการเติมกรดทาทาริกลงไปในสารละลายตะกั่ว
พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม
คือที่พีเอชสูงไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ยังคงมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน
ของตะกั่วได้ดีกว่าที่พีเอชต่ำ เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วและไคโตแซน
เป็นพันธะคีเลต เช่นเดียวกับพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างตะกั่วกับไคโตแซน โดยต่างจากพันธะที่เกิดกับ
สารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับอีดีทีเอและตะกั่วกับเอ็นทีเอที่เป็นพันธะซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดทาง
ไฟฟ้า

สำหรับผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า
มาตรฐานน้ำทิ้งได้ภายในปริมาตร 88.89 ปริมาตรเบด ซึ่งใช้เวลาเข้าสู่ภาวะสมดุลมากกว่าการทดลอง
แบบแบตซ์ 13.5 เท่า โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด 91.40%

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2545.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370638321 : MAJOR Environmental Engineering

KEY WORD: lead / chitosan / cross-linking / chelating agent / adsorption

EMMA ASNACHINDA : EFFECTS OF CHELATING AGENTS ON LEAD ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION BY CROSS-LINKED CHITOSAN.

THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUTHAR KHAODHIAR, PH.D., THESIS

COADVISOR : JIRDSAK TSCHEIKUNA, PH.D., 123 pp. ISBN 974-17-2118-8.

The objectives of this study were to investigate the effects of chelating agents on lead adsorption from aqueous solution by cross-linked chitosan in batch and continuous experiments. The aims of batch experiment were to study efficiencies and adsorption capacities of cross-linked chitosan in removing lead at different pH, lead concentration and chelating agent concentration. The chelating agents in this study are ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), nitrilotriacetic acid (NTA) and tartaric acid. And the aim of column experiments was to study the efficiencies of lead removal measuring in term of volume of wastewater pass through the column before the lead concentration in filtered water exceed the industrial wastewater standards.

The batch experiment results shown that lead adsorption capacities increased with increasing solution pH in the range of study. The amount of lead adsorption per gram chitosan also increased with increasing initial lead concentration. The presence of chelating agents, EDTA and NTA increased lead adsorption capacities in acidic pH but decreased lead adsorption capacities in basic pH. The reason were the anionic charge of lead-EDTA and lead-NTA complex reacted with protonated chitosan at low pH. The presence of tartaric acid in lead solution were not changed the lead adsorption behavior, which the adsorption capacities at high pH were still higher than at low pH due to the adsorption mechanism of the complexation between lead-tartaric. Metal-chelating complexes was expected to chemically adsorbed onto chitosan surface while lead-EDTA and lead-NTA complexes were expected to electrostatically bined onto chitosan surface.

The column experiment results shown that the volume of wastewater pass through the column ensured the lead concentration in filtered water complied with the industrial wastewater standards was 88.89 BV which take 13.5 times of batch experiment to reach equilibrium and the efficiency of adsorption was 91.40%.

Department Environmental Engineering..... Student's signature.....

Field of study Environmental Engineering..... Advisor's signature.....

Academic Year.....2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ต้องกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้ความรัก ความเอาใจใส่ และสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์มาโดยตลอดจนกระทั่ง สำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ แก่งานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โฉ่ห้วงศ์วัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และอาจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์และครูปฏิบัติกรทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องนิสิตปริญญาโท รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือเสมอมา

สถาบันนวัตยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ตะกั่ว.....	5
2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว.....	5
2.1.2 พิษของตะกั่ว.....	7
2.1.3 ประโยชน์ของตะกั่ว.....	8
2.1.4 ตะกั่วในน้ำเสีย.....	8
2.2 วิธีการกำจัดตะกั่ว.....	10
2.2.1 วิธีการดูดซับหรือดูดติดผิว.....	10
2.2.1.1 กลไกการดูดซับ.....	10
2.2.1.2 การเคลื่อนที่ของการดูดซับ.....	11
2.2.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	12
2.2.1.4 สมดุลของการดูดซับ.....	14
2.2.2 วิธีการตกตะกอน.....	16
2.3 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและคีเลชัน.....	16

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

2.4 ไคตินและไคโตแซน.....	19
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตแซน.....	19
2.4.2 ประโยชน์ของไคตินและไคโตแซน.....	20
2.4.3 การปรับปรุงคุณสมบัติของไคโตแซนโดยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย.....	22
2.4.4 สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย.....	23
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 แผนการวิจัย.....	30
3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....	30
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
3.5.1 การเตรียมสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 0 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	34
3.5.2 การเตรียมไคโตแซนแบบเม็ด.....	34
3.5.3 การเตรียมโครงร่างตาข่ายให้กับไคโตแซน.....	35
3.5.4 การศึกษาภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการใช้ไคโตแซนดูดซับตะกั่ว.....	35
3.5.4.1 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	35
3.5.4.2 การศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	36
3.5.4.3 การศึกษาปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	36
3.5.4.4 การศึกษาผลของอีดีทีเอ เอ็นทีเอ และทาทาริกที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ.....	37
3.5.4.5 การศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	38

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เตรียมได้.....	39
4.2 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยโคโตแซน แบบโครงร่างตาข่าย.....	45
4.3 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับ ตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....	46
4.4 ผลการศึกษาปริมาณโคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	49
4.5 ผลของสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....	50
4.5.1 ผลของอีดีทีเอ.....	50
4.5.2 ผลของเอ็นทีเอ.....	53
4.5.3 ผลของกรดทาทาริก.....	56
4.6 ผลการทดลองการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	61
4.7 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับในการกำจัดตะกั่วด้วยโคโตแซน แบบโครงร่างตาข่าย.....	64
4.8 การศึกษาผลการละลายของโคโตแซนหลังเกิดการดูดซับ.....	67
4.9 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	67
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยโคโตแซน แบบโครงร่างตาข่าย.....	77
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วย โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....	79
ภาคผนวก ค ผลการศึกษาปริมาณโคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วย โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....	82

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

ภาคผนวก ง ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....84

ภาคผนวก จ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยการทดลองแบบคอลัมน์88

ภาคผนวก ฉ ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว
ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....90

ภาคผนวก ช ผลการศึกษการละลายของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายหลังนำไป
ดูดซับตะกั่วจากสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ.....95

ภาคผนวก ฉ คุณสมบัติของไคโตแซนผงที่นำมาเตรียมไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....99

ภาคผนวก ญ มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....101

ภาคผนวก ฎ การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน
และการเตรียมตัวอย่าง.....106

ภาคผนวก ฏ การแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วกับสารคีเลตที่พีเอชต่างๆ
เมื่อทำการคำนวณด้วยโปรแกรม MINEQL+.....113

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัย.....	3
2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่วและสารประกอบตะกั่ว.....	6
2.2 อาการพิษของตะกั่วตามระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเลือด.....	7
3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซน.....	31
3.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาพีเอชและความเข้มข้น ของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซน.....	31
3.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสม ในการดูดซับ.....	32
3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาผลของอีดีทีเอ เอ็นทีเอ และกรดทาทาริกที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ.....	32
3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษาคออลัมน์เพื่อหาประสิทธิภาพใน การดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซน.....	33
3.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.7 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	34
4.1 ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่ว กับสารคีเลตแต่ละชนิด.....	60

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน.....	12
2.2 โครงสร้างทางเคมีของอีดีทีเอ.....	17
2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอ็นทีเอ.....	18
2.4 การเกิดคีเลชันของไอออนโลหะกับอีดีทีเอ.....	18
2.5 การเกิดคีเลชันของโลหะประจุบวกสองกับเอ็นทีเอ.....	18
2.6 โพลีเมอร์ของไคโตแซนที่ประกอบด้วย A) เบตา-ดี-กลูโคซามีน $\geq 75\%$ และ B) เอ็น-อะซีทิล-ดี-เบตา-กลูโคซามีน $< 25\%$	19
2.7 การเกิดคีเลชันระหว่างสายพอลิเมอร์ไคโตแซนกับไอออนของทองแดง.....	22
2.8 ปฏิกริยาอะซิติเลชันและการเกิดโครงร่างตาข่ายระหว่างกลูตารัลดีไฮด์ กับหมู่เอมีนบนไคโตแซน.....	24
4.1 ภาพถ่ายของไคโตแซนแบบผงขนาด 18 เมช.....	41
4.2 ภาพถ่ายของไคโตแซนแบบเม็ด.....	41
4.3 ภาพถ่ายของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย.....	41
4.4 ไคโตแซนแบบผงที่กำลังขยาย 60 เท่า.....	42
4.5 ไคโตแซนแบบผงที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	42
4.6 ไคโตแซนแบบเม็ดที่กำลังขยาย 35 เท่า.....	43
4.7 ไคโตแซนแบบเม็ดที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	43
4.8 ไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่กำลังขยาย 30 เท่า.....	44
4.9 ไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	44
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและ ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	45
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย และพีเอชที่เหมาะสมที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนด้วยโคโตนแบบโครงร่างตาข่ายและพีเอชที่เหมาะสมที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	48
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยโคโตนแบบโครงร่างตาข่ายและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนตะกั่วกับปริมาณโคโตนที่เหมาะสม.....	49
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่ออีดีทีเอในปริมาณต่างๆ	52
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่ออีดีทีเอในปริมาณต่าง ๆ	52
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอในปริมาณต่างๆ	53
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอในปริมาณต่างๆ	54
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อกรดทาทริกในปริมาณต่างๆ	56
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อกรดทาทริกในปริมาณต่างๆ	57
4.20 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 4.....	58
4.21 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 6.....	58
4.22 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 8.....	59
4.23 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 10.....	59
4.24 ชุดอุปกรณ์ทดลองแบบคอลัมน์.....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6.....	62
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับสัดส่วนความเข้มข้นน้ำเสียขาออก ต่อน้ำเสียขาเข้าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6.....	63
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำเสียขาออกกับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์เมื่อ ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6.....	63
4.28 ไอโซเทอมแบบเส้นตรงของการดูดซับสารละลายตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6.....	64
4.29 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอ ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ที่พีเอช 6 เวลาสัมผัสด 4 ชั่วโมง.....	65
4.30 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอ ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ที่พีเอช 6 เวลาสัมผัสด 4 ชั่วโมง.....	66
4.31 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทาริก ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ที่พีเอช 6 เวลาสัมผัสด 4 ชั่วโมง.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเติบโตของอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะเป็นส่วนประกอบ ทำให้เกิดภาวะมลพิษของโลหะหนักปะปนมากับน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งออกจากกระบวนการผลิต ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการทำสี อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมการทำแบตเตอรี่ เป็นต้น นอกจากนี้ทางด้านเกษตรกรรมมีการใช้ตะกั่วเป็นส่วนผสมในสารกำจัดศัตรูพืช ทำให้มีสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน ในแหล่งน้ำ ในตะกอน และในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียเป็นทางหนึ่งที่จะลดการแพร่กระจายสารตะกั่วในสิ่งแวดล้อมได้ วิธีการกำจัดตะกั่วที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีการการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation) ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและคุ้มค่าที่สุด แต่การมีสารเคมีตกค้างในน้ำ เช่น อีดีทีเอ (EDTA, Ethylenediaminetetraacetic Acid) เอ็นทีเอ (NTA, Nitrilotriacetic Acid) ซิเตรต (Citrate) และ ทาทาเรต (Tartarate) จะทำให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากสารเคมีตกค้างจะทำปฏิกิริยากับโลหะ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนทำให้คุณสมบัติในการตกผลึกและการละลายน้ำของโลหะเปลี่ยนไป การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ถึงแม้จะมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่ไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะกำจัดโลหะหนักได้ดี เนื่องจากมีข้อจำกัดของสารเคมีตกค้างและความเข้มข้นของโลหะเข้ามาเกี่ยวข้อง (Juang และ Ju, 1997) สำหรับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) วิธีออสโมซิสแบบย้อนกลับ (Reverse Osmosis) และวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) นั้นเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง การเลือกใช้วัสดุทางธรรมชาติ มาใช้เป็นสารดูดซับ (Sorbent) โลหะหนักในน้ำเสียเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากตัวกลางที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับดังกล่าวสามารถผลิตและหาได้ตามธรรมชาติ ทำให้มีราคาถูก เช่น ไคตินและไคโตแซน เปลือกข้าว ดินเหนียว เป็นต้น (Bailey และคณะ, 1999)

ไคโตแซนเป็นอนุพันธ์ของไคตินซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ พบมากในเปลือกกุ้ง เปลือกปู และกระดองของปลาหมึก รู้จักกันดีในแง่ของการเป็นสารดูดซับโลหะที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากหมู่เอมีนที่อยู่บนสายโซ่ของไคโตแซนสามารถใช้เป็นพื้นที่ในการคีเลต (Chelation

Sites) สำหรับโลหะได้หลายชนิด (Guibal และคณะ, 1994 ; Onsoyen และ Skaugrud, 1990 อ้างถึงใน Juang และ Ju, 1997)

จากการศึกษาที่ผ่านมาโคโตะแซนสามารถกำจัดโลหะต่างๆ ในน้ำเสียได้หลายชนิด และสามารถนำโลหะที่ถูกดูดซับกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เช่น ทองแดง ยูเรเนียม โครเมียม นิกเกิล แคดเมียม โคบอลต์ เหล็ก และอื่นๆ (Schumuhl, Krieg และ Keizer, 2001) แต่ โคโตะแซนแบบผงยังมีปัญหาในการดูดซับโลหะ เนื่องจากสามารถละลายได้ที่พีเอชต่ำ จึงไม่คงทนในสภาวะที่เป็นกรด จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำโคโตะแซนมาประยุกต์ให้อยู่ในรูปที่คงทนมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการนำโคโตะแซนมาทำให้อยู่ในรูปแบบของโครงร่างตาข่าย เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะให้สูงขึ้น และยังทำให้โคโตะแซนที่ได้มีความคงทนต่อสภาพกรด ต่าง และสารเคมี ต่างๆ และเนื่องจากตามธรรมชาติน้ำไม่ได้มีโลหะละลายอยู่เพียงอย่างเดียว แต่อาจมีสารอินทรีย์ และไอออนต่างๆ รวมอยู่ด้วย จึงทำการศึกษาค่าผลของสารอินทรีย์และไอออนในน้ำที่อาจมีอิทธิพลต่อการดูดซับด้วยโคโตะแซนดังกล่าวด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติและความสามารถในการดูดซับตะกั่วของโคโตะแซน ที่ผ่านการทำโครงร่างตาข่าย
2. เพื่อศึกษาเวลาสัมพัทธ์ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและปริมาณโคโตะแซนที่ผ่านการทำโครงร่างตาข่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ
3. เพื่อศึกษาค่าผลของสารคีเลตต่างๆ ได้แก่ อีดีทีเอ (EDTA, Ethylenediaminetetraacetic Acid) เอ็นทีเอ (NTA, Nitrilotriacetic Acid) และกรดทาทาริก (Tartaric Acid) ต่อการดูดซับตะกั่วด้วยโคโตะแซนแบบโครงร่างตาข่าย
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจากสารละลาย เมื่อนำโคโตะแซนแบบโครงร่างตาข่ายมาใช้งานแบบคอลัมน์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ทำการเตรียมสารดูดซับ โดยเลือกไคโตแซนแบบผงมาเตรียมให้อยู่ในรูปของโครงร่างตาข่าย (Cross-Linking Chitosan) โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงที่ทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (Cross-Linking Agent) ตามวิธีของ Hsien และ Rorrer, 1997
- 1.3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM) และหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไคโตแซน
- 1.3.3 ทำการศึกษากำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีสารคีเลตเข้ามาเกี่ยวข้องโดยทำการทดลองแบบแบตช์ ซึ่งได้เลือกอีดีทีเอ (EDTA, Ethylenediaminetetraacetic Acid) เอ็นทีเอ (NTA, Nitrilotriacetic Acid) และกรดทาทาริก (Tartaric Acid) เป็นสารคีเลต และใช้โซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$) เป็นสารปรับความแรงไอออน ในการทดลอง
- 1.3.4 ทำการทดลองแบบคอลัมน์จากข้อมูลที่ได้ในการทดลองแบบแบตช์ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์
- 1.3.5 วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตรี (Atomic Absorption Spectrometry)
- 1.3.6 ศึกษาการละลายของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย หลังจากนำไปดูดซับตะกั่วจากสารละลายที่สภาวะต่างๆ ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer

ตารางที่ 1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัย

พารามิเตอร์	ช่วงที่ทำการศึกษา
ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	0, 1, 3, 10 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาณไคโตแซน	0.00, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 และ 2 กรัม
ความเข้มข้นของสารละลายอีดีทีเอ	36, 72, 144 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัตราส่วน 1:0.5, 1:1, 1:2 โมลสารละลายตะกั่วต่อโมลสารคีเลตตามลำดับ)
ความเข้มข้นของสารละลายเอ็นทีเอ	18.5, 37, 74 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัตราส่วน 1:0.5, 1:1, 1:2 โมลสารละลายตะกั่วต่อโมลสารคีเลตตามลำดับ)
ความเข้มข้นของสารละลายกรดทาทาริก	14.5, 29, 58 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัตราส่วน 1:0.5, 1:1, 1:2 โมลสารละลายตะกั่วต่อโมลสารคีเลตตามลำดับ)
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต	0.05 มิลลิโมล
พีเอช	4, 6, 8, 10

ตารางที่ 1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัย (ต่อ)

พารามิเตอร์	ช่วงที่ทำการศึกษา
เวลาสัมพัทธ์	1, 5, 10, 15, 30 นาที และ 1, 2, 6, 12, 24, 48 ชั่วโมง
อุณหภูมิ	28 ± 3 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบในการเขย่า	200 รอบต่อนาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียด้วยโคโคแทนแบบโครงสร้างตาข่าย
2. สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการดูดซับโลหะจากสารละลายที่มีสารคีเลตและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ
3. สามารถนำไปพัฒนาแนวทางในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่ว

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่อยู่ประจำพวกโลหะหนัก มีปริมาณมากที่สุดในบรรดาโลหะหนักที่มีเลขอะตอมมากกว่า 60 มีน้ำหนักอะตอม 207.2 เลขอะตอม 82 ในตารางธาตุ (Periodic Table) ตะกั่วจัดเป็นธาตุทรานซิชัน (Transition) ซึ่งเป็นโลหะหนักอยู่ในธาตุหมู่ IVA ความถ่วงจำเพาะ 11.34 จุดหลอมเหลว 327.5°C และจุดเดือด 1740°C . ที่ความดันปกติ มีวาเลนซ์ได้หลายระบบ เช่น 1, 2 และ 4 แต่ส่วนมากอยู่ในสภาวะวาเลนซ์ 2 ในธรรมชาติที่พบมากมีอยู่ 4 ไอโซโทปได้แก่ 208, 206, 207 และ 204 (World Health Organization, 1981) มีสมบัติโดยทั่วไปคืออ่อน หลอมเหลวได้ ทำให้อ่อนและดัดแปลงให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยการรีดัดหรือตีได้ตามต้องการและสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิสูงๆ (กองอาชีวอนามัย กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2522) ตะกั่วมีสีเทาหรือสีดำเมื่ออยู่ในรูปไดออกไซด์ และมีสีเหลืองหรือสีส้มเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์ แต่โดยทั่วไปจะมีสีขาวหรือไม่มีสี พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ แร่ตะกั่วที่สำคัญ คือ ตะกั่วซัลไฟด์ (Galena) สูตรเคมี PbS รองลงมา คือ ตะกั่วคาร์บอเนต (Cerussite) สูตรเคมี PbCO_3 และตะกั่วซัลเฟต (Anglesite) สูตรเคมี PbSO_4 สำหรับแร่ตะกั่วซัลไฟด์ มีปริมาณตะกั่วถึงร้อยละ 86.6 กำมะถัน (S) ร้อยละ 13.4 ถ้าเป็นผลึกมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกเต๋า และแตกออกเป็นรูปลูกเต๋าลึกๆ ถ้าผลึกเล็กละเอียดมากจะมีลักษณะระยิบระยับ มีสีผงละเอียด สีเทาตะกั่วเนื้อค่อนข้างอ่อน มีความแข็งประมาณ 2.5-3

สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว (Pb^{2+}) พบ ตะกั่วซัลไฟด์ และตะกั่วออกไซด์ มักไม่ละลายน้ำ ยกเว้นจะอยู่ในรูปของไนเตรต คลอไรด์ และคลอไรด์ ดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้เกลือของตะกั่วบางชนิดจะอยู่ในรูปกรดอินทรีย์ เช่น Lead Oxalate ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ (World Health Organization, 1981) ในเปลือกโลกตะกั่วในพื้นดินอาจเกิดตามธรรมชาติหรืออาจเกิดจากภาวะมลพิษดินมีสภาพเป็นกรดซึ่งจะมีสารตะกั่วน้อยกว่าดินที่เป็นด่าง เนื่องจากอินทรีย์สารในดินอาจทำปฏิกิริยากับสารตะกั่วที่มีอยู่ (กองอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2543)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่วและสารประกอบตะกั่ว (World Health Organization, 1981)

Name	Synonym & Formula	Molecular Weight	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Solubility in cold water (g/litre)	Soluble in
Lead	Pb	207.19	327.502	1740	Insoluble	HNO ₃ ; hot Conc. H ₂ SO ₄
Lead acetate	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	325.28	280	443	-	hot water; glycerin; alcohol
Lead aside	Pb(N ₃) ₂	291.23	-	Explodes at 350	Slightly (0.23)	acetic acid; hot water
Lead carbonate	Cerrusite PbCO ₃	267.20	315 (decomposes)	-	0.0011	acid; alkali; decomposes
Lead chlorate	Pb(ClO ₃) ₂	374.09	230 (decomposes)	-	very soluble	alcohol
Lead chloride	cotunite PbCl ₂	278.10	501	950	9.9	NH ₄ salts; dilute HCl NH ₃ ; hot water
Lead chromate	crocoite, yellow PbCrO ₄	328.18	844 (decomposes)	-	0.000058	alcohol; alkali
Lead nitrate	Pb(NO ₃) ₂	331.20	470 (decomposes)	-	376.5	alcohol; alkali; NH ₃ ; hot water
Lead orthophosphate	Pb ₃ (PO ₄) ₂	811.51	1014	-	0.00014	alkali; HNO ₃
Lead oxalete	PbC ₂ O ₄	295.21	300 (decomposes)	-	0.0016	HNO ₃
Lead-dioxide	Plattnerite PbO ₂	239.19	290 (decomposes)	-	insoluble	dilute HCl; acetic acid (slightly)
Lead-mono oxide	Litharge PbO	223.19	888	-	0.017	HNO ₃ ; alkali; NH ₄ Cl
Lead stearate	Pb(C ₁₈ H ₃₅ O ₂) ₂	774.15	115.7	-	0.5	hot water; ether
Lead sulfate	Anglesite PbSO ₄	303.25	1170	-	0.0425	NH ₄ salts; conc.H ₂ SO ₄
Lead sulfide	Galena, PbS	239.25	1114	-	0.00086	acid
Tetraethyl lead	Pb(C ₂ H ₅) ₄	323.44	-136.80	200	insoluble	benzene; ether petroleum; alcohol;
Tetramethyl lead	Pb(CH ₃) ₄	267.3	-27.5	110	insoluble	benzene; ether petroleum; alcohol;

^a Adapted from West, R. C., ed. Handbook of Chemistry and Physics, 55th edition, Cleveland, Ohio, Chemical Rubber Company, 1974.

2.1.2 พิษของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นสารพิษที่ทำให้เกิดโรคเรื้อรัง เพราะการดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายเป็นไปอย่างช้ามากและการขับถ่ายออกจากร่างกายก็ช้าด้วย โดยตะกั่วจะถูกสะสมตามเนื้อเยื่อต่างๆ พิษของตะกั่วแบบเรื้อรังที่สำคัญได้แก่โรคโลหิตจางซึ่งเกิดจากการเจือปนของตะกั่วในร่างกาย ทั้งนี้ตะกั่วจะไปยับยั้งการสังเคราะห์เฮม (heme) ในเม็ดเลือดแดง โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เฮม เช่น δ -aminolevulinic acid (ALA) dehydratase (PBG synthetase) และตะกั่วจะรบกวนการสังเคราะห์โปรตีนโกลบิน โดยจะเข้าไปจับกับหมู่ไทออลในโมเลกุลของเอนไซม์ การวัดเอนไซม์ ALA dehydratase ในเลือดเพื่อตรวจหาปริมาณตะกั่วพบว่า เมื่อมีระดับตะกั่วในร่างกายเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์นี้ลดลง เมื่อเกิดภาวะโลหิตจางรุนแรงขึ้นจะทำให้เกิดความผิดปกติที่ระบบประสาทส่วนกลาง ความสามารถในการเรียนรู้ช้าลง ไอคิวต่ำ ความจำเสื่อม ควบคุมการทรงตัวไม่ได้ ปวดศีรษะ วิดกกังวล หากเกิดความเป็นพิษรุนแรงมากไตจะวาย ชัก โคม่าและเสียชีวิตได้ ส่วนอาการเป็นพิษเนื่องจากตะกั่วแบบเฉียบพลันมีอยู่หลายแบบด้วยกันเช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้ วิงเวียน การระตุกของกล้ามเนื้อและอาการอื่นๆ โดยอาการพิษของตะกั่วจะผันแปรตามระดับของตะกั่วในเลือด ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อาการพิษของตะกั่วตามระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเลือด (นิธิยา และ วิบูลย์, 2543)

ระดับของตะกั่วในเลือด (มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร)	อาการพิษ
25-30	โปรโตพอร์ไฟรินเพิ่มขึ้นในเลือดและ ALA เพิ่มขึ้นในปัสสาวะ
40-50	เฮมาโตคริตและเฮโมโกลบินลดลงและ ALA เพิ่มขึ้น
50-60	เกิดภาวะโลหิตจาง
> 60	ตื่นเต้น ไม่อยู่นิ่ง ควบคุมตัวเองไม่ได้ ก้าวร้าว
> 120	ปัญญาอ่อน ตาบอดและเสียชีวิต

2.1.3 ประโยชน์ของตะกั่ว (ปรัชญาพร, 2535)

โดยทั่วไปแล้วจะนำตะกั่วมาใช้ใน 3 ลักษณะดังนี้

1. ตะกั่วโลหะ โดยคุณสมบัติที่คงทนต่อการผุกร่อนและอ่อนตัวหลอมเหลวได้ง่าย รวมทั้งคุณสมบัติในการป้องกันการแผ่รังสี ตะกั่วจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการหล่อตัวพิมพ์ หุ้มสายเคเบิล สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์ ทำหัวกระสุนปืน ใช้ชุบเคลือบโลหะเพื่อป้องกันสนิม เชื่อมบัดกรี เป็นอุปกรณ์ป้องกันรังสีจากเครื่องเอกซเรย์หรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู และใช้ทำโลหะผสมต่างๆ เช่น ทองสัมฤทธิ์ ทองเหลือง
2. ตะกั่วอนินทรีย์ ได้แก่
 - ก. ตะกั่วออกไซด์ (Lead Oxide) แบ่งเป็น
 - ตะกั่วโมโนออกไซด์ (Lead monoxide) หรือ Litharge ใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน
 - ตะกั่วไดออกไซด์ (Lead dioxide) ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์และเครื่องจักร
 - ตะกั่วแดง (Pb_3O_4) ใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อกันสนิม หรือเคลือบรถยนต์
 - ข. ตะกั่วคาร์บอเนต (Lead carbonate) ผสมกับ Lead hydroxide รวมกันเรียกว่า ตะกั่วขาว ผสมในฝุ่นสีขาว สีน้ำมัน หมึกพิมพ์ สีพลาสติก ตะกั่วโครเมต ตะกั่วซัลเฟต ใช้ทำสีเหลืองสำหรับผสมในสีน้ำมัน สีพิมพ์ ฝุ่นสีเหลือง และหมึกพิมพ์
 - ค. ตะกั่วอะซิเตต (Lead acetate) เป็นเกลือของตะกั่วที่ละลายน้ำได้ดีและใช้ในเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม
 - ง. ตะกั่วไนเตรต (Lead nitrate) ใช้ในอุตสาหกรรมยางและพลาสติก
3. ตะกั่วอินทรีย์ ได้แก่ ตะกั่วสเตียเรต (Lead stearate) ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแล็คเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น จานสี และผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้อาจใช้ตะกั่วในรูปอื่น เช่น ตะกั่วอาร์ซีเนต (Lead arsenate) ในยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืช ตะกั่วซิลิเกต (Lead silicate) ใช้ผสมลงไปในการบ่ม เครื่องเคลือบ เซรามิก เพื่อให้เกิดความเป็นเงางามและผิวเรียบ

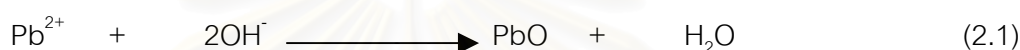
2.1.4 ตะกั่วในน้ำเสีย

ตะกั่วเป็นสารมลภาวะที่ไม่สลายตัวเองตามธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งานหรือเกิดจากกิจกรรมที่มีการใช้ตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เช่น ในโรงงานทำแบตเตอรี่ การทำบัดกรี การทำตัวพิมพ์ เป็นต้น

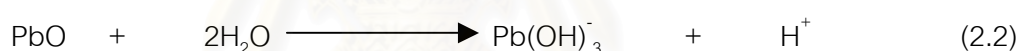
พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำคือ ความเป็นต่าง ความกระด้าง และพีเอช โดยอัตราส่วนของความเป็นต่างที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต-ไฮดรอกไซด์จะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ความกระด้างก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นต่างและพีเอชเช่นเดียวกัน (Nayer และ Dague, 1975 อ้างถึงใน ปรีดา นันทพูลทรัพย์, 2544)

ผลของพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช โดยที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วจะอยู่ในรูปของสารละลาย พีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ 2.1



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ จะละลายที่พีเอชมากกว่า 11 ดังสมการที่ 2.2



ผลของความกระด้าง

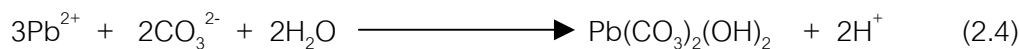
การละลายของตะกั่ว ถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ซึ่งที่พีเอชนี้ ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ไอออนลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

ผลของความเป็นต่าง

น้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอเนตไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนต ไอออนที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการที่ 2.3



ที่พีเอช 8.5-12.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ 2.1 หรืออาจจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนตพื้นฐาน (Basic lead carbonate) ดังสมการที่ 2.4



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ ตามสมการที่ 2.2

2.2 วิธีการกำจัดตะกั่ว

2.2.1 วิธีการดูดซับหรือดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของแข็งหรือของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (Adsorbent)

2.2.1.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

กระบวนการการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแรงที่เข้ามาเกี่ยวข้อง

การดูดซับทางกายภาพบนของแข็ง เชื่อว่าเป็นคุณสมบัติของแรงระหว่างผิวหน้าของของแข็งกับโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) แรงดังกล่าวเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและนิวคลีไอของระบบ ซึ่งได้แก่แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) และ แรงกระจาย (Dispersion Forces) ทั้งนี้แรงกระจายจะมีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิด และเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดซับจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (Multilayers) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลก่อนหน้าซึ่งจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวหน้าของของแข็ง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีจึงมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีความสัมพันธ์กับพลังงานการกระตุ้น (Activation Energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ และไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้บนพื้นผิวดังกล่าว จึงอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับและเป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) สามารถแยกแยะออกจากการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ได้เมื่อเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งหรือมากกว่าตามที่จะกล่าวต่อไปนี้

1. การดูดซับทางกายภาพเป็นแรงที่เกี่ยวกับสารชนิดเดียวที่สามารถเกิดย้อนกลับได้ กล่าวคือสามารถเกิดการคายสารออก (Desorption) ได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้กระบวนการที่เกิดจะเป็นไปอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการแพร่ โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับการแบ่งหรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีและไม่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ (Irreversible)

2. การดูดซับทางกายภาพไม่เจาะจงบริเวณที่จะเกิดการดูดซับ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายตัวเองได้ตลอดทั้งพื้นผิว สามารถวัดพื้นที่ของของแข็งของสารดูดซับได้ ในทางตรงกันข้าม การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับเฉพาะที่ โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีจะติดอยู่กับบริเวณที่เจาะจงให้เกิดการดูดซับเท่านั้น

3. ความร้อนที่เกิดขึ้นของการดูดซับทางกายภาพ จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางเคมี ซึ่งขีดจำกัดบนสุดของการดูดซับทางกายภาพอาจสูงกว่า 20 kcal/mol ของสารดูดซับที่มีรูพรุนเล็กน้อย ส่วนความร้อนจากการดูดซับทางเคมีอยู่ในช่วงค่าที่สูงกว่า 100 kcal/mol และต่ำกว่า 20 kcal/mol

2.2.1.2 การเคลื่อนที่ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

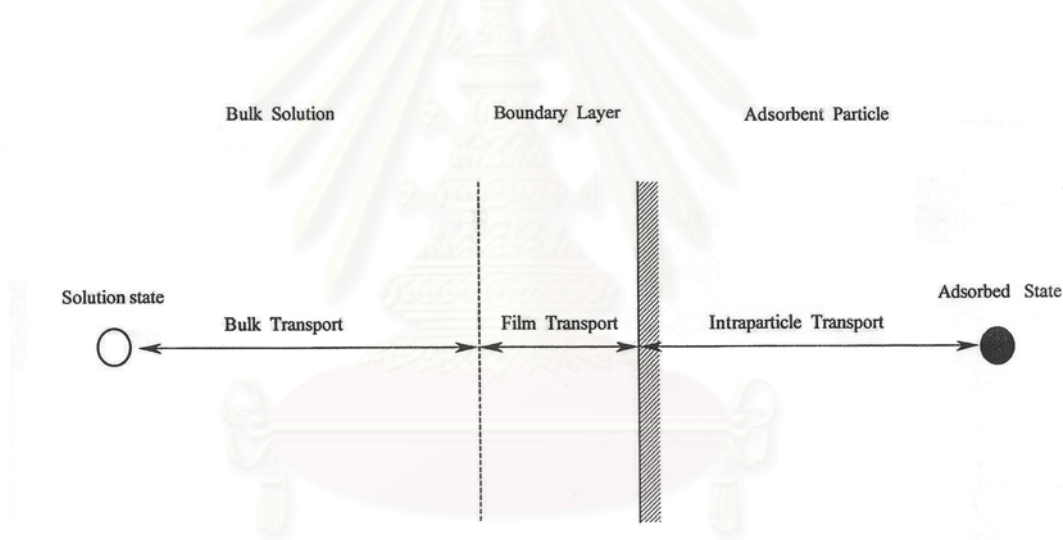
การเคลื่อนที่ของการดูดซับเกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer) ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดซับ การดูดซับสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การดูดซับขั้นแรก เป็นการขนส่งสารถูกดูดซับทั้งก้อน (Bulk Transport) โดยวิธีการแพร่ของโมเลกุลจากสารละลายไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่ภายนอก (External or film diffusion)

2. การดูดซับขั้นที่สอง เป็นการแพร่ภายใน (Internal diffusion) เกี่ยวข้องกับการขนส่งชั้นฟิล์มของสารถูกดูดซับจากผิวหน้าของอนุภาคเข้าสู่พื้นผิวภายใน (Film Transport) โดยวิธีการแพร่เข้าไปในรูพรุนที่เต็มไปด้วยของเหลวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ และเคลื่อนที่ไปตลอดพื้นผิวรูพรุนของของแข็งนั้น (Surface diffusion)

3. การดูดซับขั้นที่สาม เป็นการดูดซับของสารที่ละลายที่อยู่ภายในพื้นผิวของรูพรุน ซึ่งมีการแพร่เข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) กล่าวได้ว่าเป็นการขนส่งกันภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) การดูดซับในขั้นนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากจึงไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่โดยรวม

อัตราการดูดซับทั้งหมดควบคุมโดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการแพร่ภายในและการแพร่ภายนอก อย่างไรก็ตามการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในบางระบบอาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งกันภายในอนุภาค และการแพร่ภายนอก



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนของการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน (Eckenfelder, 1981)

2.2.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ธรรมชาติของสารดูดซับ

1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นผลของความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิว จึงเห็นได้ชัดว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ โดยการดูดซับสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น

1.2 ขนาดของอนุภาค

พื้นที่ผิวของสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นหากเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตามสำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ที่อยู่ในโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าว ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

1.3 สภาพทางเคมีของพื้นผิว

หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของสารดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยการเปลี่ยนแปลงของข้อประจุบนผิวหน้าระหว่างการดูดซับทางเคมี จะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายหลายชนิด

2. ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหากคุณสมบัติของสารถูกดูดซับได้แก่ ความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีการไม่ชอบน้ำมากขึ้นและมีความสามารถในการละลายได้ลดลง นอกจากนี้มวลโมเลกุลที่มีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสารถูกดูดซับใหญ่ขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

3. ผลของไฮโดรเจนไอออน (พีเอช)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ โดยความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายลดลง และจะเพิ่มมากขึ้นถึงขีดสุดเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ pK_a

4. ผลของไอออนตัวอื่นๆ ในน้ำ

องค์ประกอบอนินทรีย์ในน้ำ เช่น Ca^{2+} Mg^{2+} สามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำได้ เช่น การมีแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำ จะเพิ่มเนื้อที่ในการดูดซับของกรดฟัลวิก เป็นต้น

5. ผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงข้ามหากอุณหภูมิลดลง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.2.1.4 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibria)

การดูดซับของสารละลายเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวถูกละลาย ที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับจะมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งหนึ่ง ตัวถูกละลายจะเกิดการถูกดูดซับและหลุดออกมาในจำนวนเท่าๆ กันที่เวลาเดียวกัน จนกว่าจะเกิดสภาวะสมดุลซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายในสารละลายอีกต่อไป

การแสดงปริมาณสารที่ถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ในแง่ของความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) สมการที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่ใช้กันมากได้แก่

1. ไอโซเทอมการดูดซับชนิดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมการของแลงมัวร์เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว ที่มีสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวที่จำกัดของสารดูดซับ
2. แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer)
3. พื้นที่ในแต่ละแห่งจะถูกจำกัดปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสภาพทางเรขาคณิตของพื้นผิวนั้นๆ
4. พลังงานในการดูดซับจะมีค่าเท่ากันในทุกบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นผิวสารดูดซับหรือข้ามไปยังโมเลกุลอื่นได้

สมการการดูดซับของแลงมัวร์แสดงดังสมการที่ 2.5

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.5)$$

โดยที่ $X = \frac{x}{m}$ หรือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (m)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิด Monolayer

b = ค่าคงที่ของระบบ

2. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการของ Freundlich เป็นสมการการดูดซับทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดโดยมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 2.6

$$\frac{x}{m} = KC_c^{\frac{1}{n}} \quad (2.6)$$

โดยที่ x = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ

m = น้ำหนักของสารดูดซับ

C_c = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลย์ของตัวถูกละลาย

$K, \frac{1}{n}$ = ค่าคงที่ของระบบ

3. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที (BET Adsorption Isotherm)

เป็นสมการที่ได้รับการพัฒนาโดย Brunauer, Emmett และ Teller (BET) ในการอธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวเช่นเดียวกับสมการของแลงมัวร์ดังสมการที่ 2.7

$$X = \frac{X_m BC_c}{(C_s - C_c) \left[1 + (B-1) \frac{C_c}{C_s} \right]} \quad (2.7)$$

โดยที่ $X = \frac{x}{m}$ หรือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (m)

C_c = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล

C_s = ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิด Monolayer

B, C = ค่าคงที่ของระบบ

2.2.2 วิธีการตกตะกอน (Precipitation)

ตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยทั่วไปสามารถกำจัดได้ด้วยวิธีการตกตะกอนให้อยู่ในรูปของ ตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3$) ตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ตะกั่วซัลไฟด์ โดยการเติมโซดาแอสไฮม์ และโซเดียมซัลไฟด์ตามลำดับ (Faust และ Aly, 1987) แต่การตกตะกอนตะกั่วในรูปไฮดรอกไซด์ นั้นมีประสิทธิภาพต่ำ แม้ว่าปริมาณคาร์บอเนตในน้ำเสียเพียงเล็กน้อยจะสนับสนุนให้เกิดเกลือ ของตะกั่วในรูปตะกั่วคาร์บอเนต และตะกั่วไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตก็ตาม (Patterson และคณะ, 1987 อ้างถึงใน Ford, 1992) การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตสามารถควบคุมและมีประสิทธิภาพ ในการกำจัดของแข็งที่เกิดจากตะกั่วได้เล็กน้อย ส่วนการตกตะกอนตะกั่วในรูปของซัลไฟด์นั้นไม่มี ประสิทธิภาพเพียงพอ (Patterson, 1985 อ้างถึงใน Ford, 1992)

นอกจากนี้วิธีการตกตะกอนยังมีปัญหาในการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้น และไม่สามารถใช้ กับระบบที่มีอัตราการไหลต่ำหรือมีการเดินระบบเป็นช่วงได้ อีกทั้งยังเกิดการตกตะกอนได้ยากหาก เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วและพีเอชหลังการกำจัดจะมีค่าค่อนข้างสูงรวมไปถึงการนำ กลับตะกั่วมาใช้ใหม่ก็ทำได้ยาก

การใช้โคโคแชนเป็นสารดูดซับในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำ ได้และสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าว เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักรวมไปถึงตะกั่ว ในน้ำได้เป็นอย่างดีและสามารถแยกโลหะที่ถูกดูดซับไว้มาใช้ใหม่ได้ด้วย (Lasko และ Hurst, 1999)

2.3 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและคีเลชัน (Complexation และ Chelation)

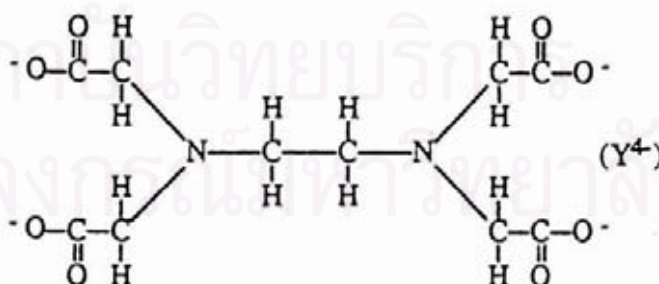
ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำอาจเกิดการรวมตัวกับตัวให้อิเลคตรอน เกิดเป็นสารประกอบ เชิงซ้อน (Complex) หรือ สารประกอบโคออดิเนชัน (Coordination Compound) ได้ แต่สิ่งที่มี ความสำคัญมากกว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนคือสารคีเลต (Chelating Agent) โดยสารคีเลต นั้น จะมีจำนวนอะตอมที่สามารถเข้าไปเกิดพันธะกับอะตอมกลางของไอออนโลหะในเวลาหนึ่งๆ เพื่อเกิดเป็นโครงสร้างวงแหวนได้มากกว่า 1 อะตอม

เนื่องจากสารคีเลตสามารถเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้มากกว่า 1 ตำแหน่งในเวลา เดียวกัน จึงทำให้โดยปกติแล้วสารประกอบจากการเกิดคีเลชันจึงมีเสถียรภาพมากกว่าสาร ประกอบเชิงซ้อน โดยความเสถียรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของบริเวณที่สามารถเกิดการ คีเลตได้บนลิแกนด์นั้นๆ ซึ่งโครงสร้างของแต่ละโลหะที่เกิดการคีเลตนั้นจะมีรูปร่างแตกต่างกัน

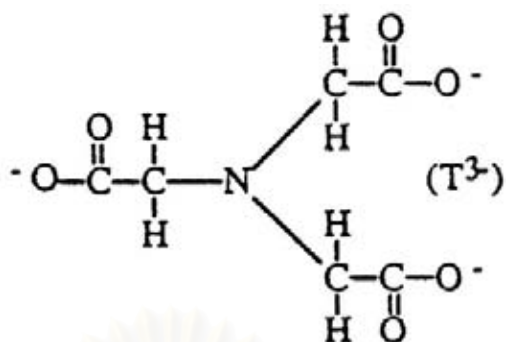
ในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียสามารถพบลิแกนด์ได้ทั่วไป โดยจะอยู่ในรูปของหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายซึ่งสามารถจับกับอิเลคตรอน เพื่อสร้างพันธะระหว่างตัวมันเองและไอออนของโลหะ ลิแกนด์ที่มีมากได้แก่ลิแกนด์ของคาร์บอกซีเลต (Carboxylate) ฟอสเฟต (Phosphate) เฮทเทอโรไซคลิกไนโตรเจน (Heterocyclic nitrogen) ฟีนอกไซด์ (Phenoxide) และอะลิฟาติกและอะโรมาติกอะมิโน (Aliphatic and aromatic amino) ซึ่งลิแกนด์ดังกล่าวสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะที่พบในทั้งน้ำดีและน้ำเสียได้ เช่น Mg^{2+} Ca^{2+} Fe^{2+} Cu^{2+} Pb^{2+} Ni^{2+} เป็นต้น

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอาจเกิดผลกระทบได้หลายอย่าง รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาของลิแกนด์กับโลหะ ซึ่งอาจเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ดีคาร์บอกซีเลต และไฮโดรไลซิส การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในออกซิเดชันสเตทของโลหะ และอาจทำให้โลหะที่มาจากสารประกอบที่ไม่ละลายเกิดการละลายได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายสามารถกำจัดโลหะไอออนออกจากสารละลายได้

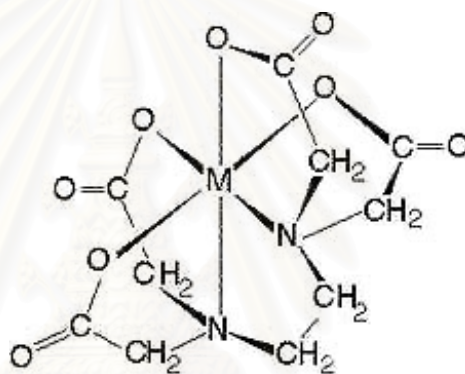
อีดีทีเอ (Ethylenediaminetetraacetate) และ เอ็นทีเอ (Nitrilotriacetate) มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 โดยเป็นสารคีเลตที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ในโรงงานชุบโลหะ การทำผงซักฟอก เป็นต้น สารประกอบเชิงซ้อนของอีดีทีเอมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อย จึงมักพบในท่อน้ำทิ้ง (Sewage effluent) น้ำใต้ดิน (Ground water) และตามแหล่งน้ำทั่วไป (Fresh water) โดยจะถูกชะออกมาหรือตกตะกอนสู่พื้นน้ำหรือในชั้นน้ำใต้ดิน นิยมใช้เป็นสารคีเลตเพื่อเป็นลิแกนด์ในการทำให้เกิดสารเชิงซ้อนแบบคีเลตกับไอออนโลหะ โดยอีดีทีเอจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรมากกับโลหะหนักด้วยอัตราส่วนโลหะต่อลิแกนด์เท่ากับ 1:1 ในขณะที่เอ็นทีเอจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยอัตราส่วนโลหะต่อลิแกนด์เท่ากับ 1:2 การเกิดคีเลชันของโลหะกับอีดีทีเอและเอ็นทีเอ แสดงดังรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5



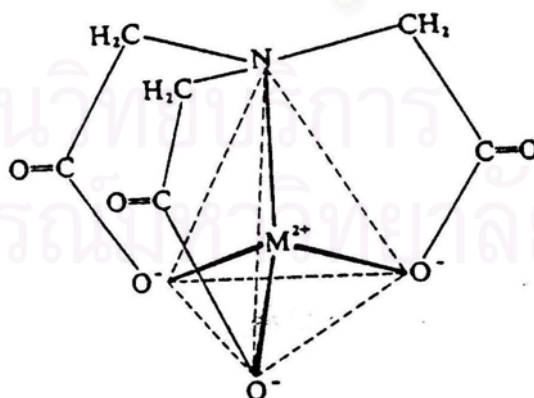
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของอีดีทีเอ (Stanley, 1994)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอ็นทีเอ (Stanley, 1994)



รูปที่ 2.4 การเกิดคีเลชันของไอออนโลหะกับเอ็ดทีเอ (Kloner, Hempel และ Nortemann, 1998)

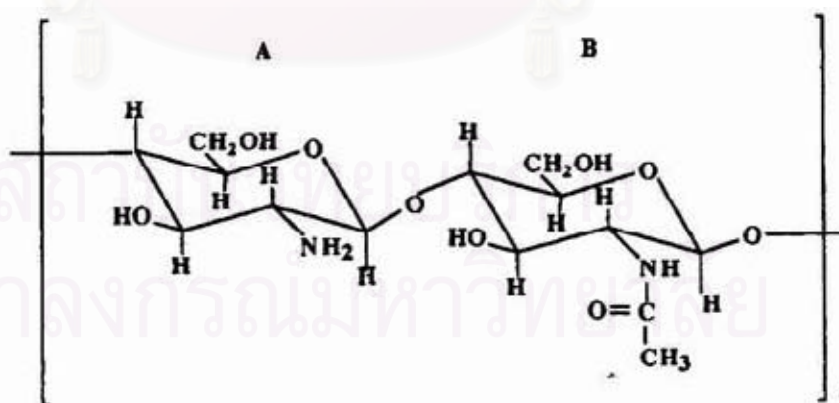


รูปที่ 2.5 การเกิดคีเลชันของโลหะประจุบวกสองกับเอ็นทีเอ (Stanley, 1994)

2.4 ไคตินและไคโตแซน

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตแซน

ไคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส สกัดได้จากเปลือกปู กุ้ง แขนงของปลาหมึก และที่ผนังเซลล์ของเห็ดราบางชนิด มีชื่อทางเคมีว่า poly- β -(1,4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose สูตรเคมีคือ $(C_8H_{13}NO_5)_n$ รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงโพลิเมอร์ของไคตินที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของกลูโคซามีน (Glucosamine) และเอ็น-อะซิติลกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine) (Ngha และ Liang, 1999) โดยไคโตแซนเป็นโพลิเมอร์ทางชีวภาพที่มีประจุบวกและมีมวลโมเลกุลสูง ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโพลิเมอร์ของ β -(1,4)-2-deoxy-2-amino-D-glucopyranose และมีบางส่วนเป็น β -(1,4)-2-deoxy-2-acetamido-D-glucopyranose (Felt และคณะ, 1998; KAS, 1997 อ้างถึงใน Yang และคณะ, 1999) ไคโตแซนได้จากการกำจัดหมู่อะซิติล (Deacetylation) ของไคตินด้วยสารละลายต่างเข้มข้นเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Coughlin และคณะ, 1990 อ้างถึงใน Wu และคณะ, 1999) มีชื่อทางเคมีว่า poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose สูตรเคมีคือ $(C_6H_{11}NO_4)_n$ ไคโตแซนเป็นที่รู้จักกันดีในแง่ของการเป็นสารดูดซับโลหะที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากหมู่เอมีนที่อยู่บนสายโซ่ของไคโตแซนสามารถใช้เป็นพื้นที่ในการคีเลต (Chelation Sites) สำหรับโลหะได้หลายชนิด (Guibal และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.6 แสดงโพลิเมอร์ของไคโตแซนที่ประกอบด้วย A) เบตา-ดี-กลูโคซามีน $\geq 75\%$ และ B) เอ็น-อะซิติล-ดี-เบตา-กลูโคซามีน $< 25\%$ (Lasko และ Hurst, 1999)

ไบโอดีแซนเป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) สามารถย่อยสลายได้ทางในธรรมชาติ (Biodegradable) มีสมบัติด้านการชอบน้ำ (Hydrophilicity) ไม่มีความเป็นพิษ (Nontoxic) ต้านแบคทีเรีย (Antibacterial) จึงได้รับความสนใจในการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการเภสัชกรรมและในวงการแพทย์เป็นจำนวนมาก (Chun และคณะ, 1997)

2.4.2 ประโยชน์ของไคตินและไคโตแซน

การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตแซน มีการนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางซึ่งอาศัยสมบัติเฉพาะของโพลิเมอร์ชีวภาพนี้ แนวทางการประยุกต์ใช้สามารถแบ่งเป็นหัวข้อ ได้ดังนี้

1. งานด้านอุตสาหกรรม

ในอุตสาหกรรมกระดาษ มีการนำไคตินและไคโตแซนมาใช้เป็นสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษในขณะเปียกและแห้ง (Wet and dry strength) และใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียว (Thickener) เพื่อใช้ในงานพิมพ์กระดาษ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอใช้ไคตินและไคโตแซนช่วยในการย้อมสีเส้นใยสิ่งทอที่มีการย้อมสีติดได้ยากให้ง่ายขึ้น โดยการนำเส้นใยนั้นมาผสมหรือเคลือบผิวด้วยไคตินและไคโตแซน และช่วยเพิ่มความคงทนของสี ปรับปรุงด้านความแข็งแรงของเส้นใยรวมทั้งช่วยลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ในเส้นใยสังเคราะห์อีกด้วย (รัตเกล้า, 2539) การนำไคโตแซนมาใช้ทำเป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหาร โดยละลายไคโตแซนในกรดฟอร์มิกหรือกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปบนแผ่นโพลีเอทิลีน หรือแผ่นแก้ว จากนั้นจึงทำให้แห้ง จะได้ฟิล์มที่เหนียว ใส ยืดหยุ่น ทนอุณหภูมิได้สูงและสามารถรับประทานได้ (อัศวิน, 2539)

2. งานด้านเภสัชกรรมและการแพทย์

ไคโตแซนอะซิเตต (Chitosan acetate) สามารถนำมาทำผิวหนังเทียมเพื่อรักษาบาดแผลที่เกิดจากการติดเชื้อที่ผิวหนัง แผลไฟไหม้ และแผลพุพองเป็นหนองได้ ไคตินและไคโตแซนสามารถนำมาทำให้อยู่ในรูปของเส้นใยบางแต่มีความแข็งแรง ซึ่งสามารถนำมาทำเป็นไหมเย็บแผลได้โดยไม่ต้องตัดทิ้งเมื่อแผลหายดีแล้ว เนื่องจากไหมสามารถสลายได้เอง สำหรับงานด้านดวงตาไคตินและไคโตแซนสามารถนำมาผลิตคอนแทคเลนส์ (Contact lense) ซึ่งเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกายมากกว่าโพลิเมอร์สังเคราะห์ เนื่องจากเลนส์มีความสามารถในการดูดน้ำและให้อากาศซึมผ่านได้ (รัตเกล้า, 2539) ในงานด้านศัลยกรรมสามารถนำไคตินและไคโตแซนมา

ใช้เป็น Post-surgical Adhesions โดยการสังเคราะห์ร่วมกับ พอลิเอทธิลีน ไกลคอล อัลดีไฮด์ (Bloom, 2001) นอกจากนี้ไคตินและไคโตแซน เมื่อนำมาสังเคราะห์ให้มี Polymeric Nanoparticles (NP) จะสามารถนำมาใช้ในการส่งผ่านยาให้เข้าไปถึงอวัยวะที่ต้องการรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Yang และคณะ, 1999)

3. งานด้านอาหารและยา

เนื่องจากไคตินและไคโตแซนเป็นสารที่ไม่มีพิษจึงปลอดภัยในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบผิวผลไม้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานออกไปและป้องกันเชื้อรา และได้มีการใช้ไคตินในการเป็นสารเพื่อเพิ่มความหนืดให้อาหารในรูปของ Micro Crystalline Chitin ซึ่งสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสำหรับการฆ่าเชื้อและอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่แข็งได้ (รัตเกล้า, 2539)

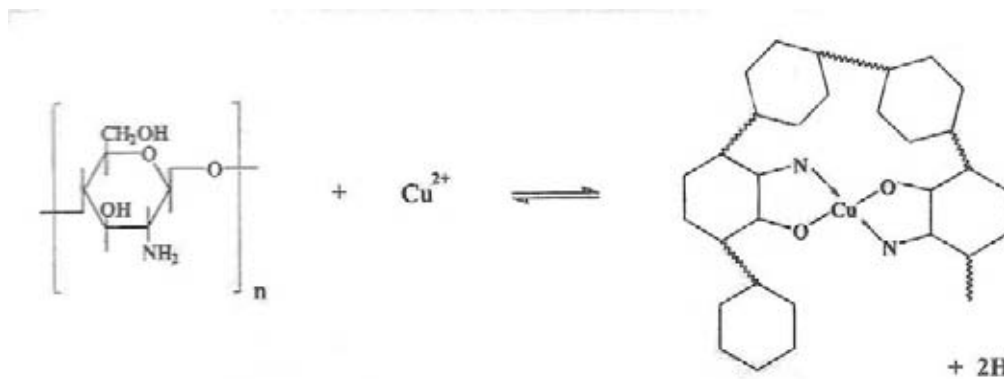
ไคโตแซนยังมีประโยชน์ในการช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินอาหาร เช่น มะเร็งลำไส้ ท้องผูก โรคอ้วน และไขมันอุดตันในเส้นเลือด เนื่องจากไคโตแซนเป็นเส้นใยอาหารที่ได้จากสัตว์ เป็นสารคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีรสหวาน ไม่ละลายน้ำ ไม่ย่อยในกระเพาะอาหารของคน แต่มีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายและสามารถเลือกจับกับกรดไขมันได้ (Shahidi และคณะ, 1999)

4. งานด้านการเกษตร

ไคโตแซนมีประโยชน์ในงานด้านการเกษตร ในแง่ของการใช้เป็นสารเคลือบป้องกันเมล็ดพันธุ์พืชจากการเป็นโรคและศัตรูพืช และช่วยยืดอายุของการเก็บรักษา รวมไปถึงใช้เป็นปุ๋ยน้ำสำหรับพืชประเภทไม้ดอก ช่วยลดการระเหยของน้ำและทนต่อการถูกชะล้างได้ดี ไคโตแซนยังมีประโยชน์ในการใช้ยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิดและกระตุ้นกระบวนการต่างๆ ในเนื้อเยื่อพืชให้เกิดภูมิต้านทานเชื้อราบางชนิด (Shahidi และคณะ, 1999)

5. งานด้านการบำบัดน้ำเสีย

จากการศึกษาที่ผ่านมาไคโตแซนสามารถกำจัดโลหะต่างๆ ในน้ำเสียได้หลายชนิด เช่น ทองแดง ตะกั่ว ยูเรเนียม โครเมียม นิกเกิล แคดเมียม โคบอลต์ เหล็ก แมงกานีส แพลตินัม อิริเนียม และ วานาเดียม (Schmuhi และคณะ, 2001) เนื่องจากไคโตแซนเป็นโพลีเมอร์ประจุบวกที่มีหมู่อะมิโน (Amino Group) โดยที่ไนโตรเจนในหมู่อะมิโนจะสร้างพันธะโคออดิเนชันกับโลหะหนักได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถใช้ไคโตแซนเป็นสารช่วยในการตกตะกอนกับสิ่งเจือปนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นประจุลบได้ (รัตเกล้า, 2539)



รูปที่ 2.7 การเกิดคีเลชันระหว่างสายโพลิเมอร์ไคโตแซนกับไอออนของทองแดง (Kaminski และ Modrzejewska, 1997)

2.4.3 การปรับปรุงคุณสมบัติของไคโตแซน โดยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) (รัตเกล้า, 2539)

การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของไคโตแซนให้เกิดโครงร่างตาข่าย มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความเหมาะสมแก่การนำมาใช้งาน ซึ่งในบางกรณีไคโตแซนอาจมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เป็นไปตามความต้องการ เช่น ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ความยืดหยุ่น (Flexibility) ความเปราะ (Brittleness) และความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) เป็นต้น

ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งโพลิเมอร์จะมีสายโซ่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไอออนิก เกิดโครงร่างตาข่ายแบบสามมิติ (Three-Dimensional Network) ซึ่งการเกิดโครงร่างตาข่ายจะทำให้โพลิเมอร์มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางด้านความร้อน

ปกติโพลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายจะเกิดการหลอมและไหลได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ในทางตรงข้ามโพลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่าย จะไม่สามารถเกิดการหลอมเหลวได้และสูญเสียสมบัติการไหล เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกจำกัดการเคลื่อนไหวจากโครงร่างตาข่ายและเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงๆ โพลิเมอร์จะไม่หลอมแต่จะเกิดการสลายตัวแทน

2. สมบัติทางเคมี

โพลีเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายจะเกิดการละลายได้ในตัวทำละลายที่เหมาะสม เนื่องจากโมเลกุลของโพลีเมอร์และตัวทำละลายสามารถผสมกันดีเป็นอันดับหนึ่ง โดยแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับโพลีเมอร์มีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุล แต่สำหรับโพลีเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายจะไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายแต่จะเกิดการพองตัว เนื่องจากตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างของตัวโพลีเมอร์ได้ ทำให้ตัวทำละลายไม่เข้าไปเกิดผลกระทบต่อพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ ทั้งนี้ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย (Cross-linking Density) จะมีผลต่อการยอมรับเอาปริมาณตัวทำละลาย กล่าวคือถ้าโพลีเมอร์เกิดโครงร่างตาข่ายน้อย จะทำให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ทำให้เกิดการพองตัวได้มาก แต่โพลีเมอร์ที่เกิดโครงร่างอย่างแท้จริงตัวทำละลายจะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ และจะไม่เกิดการพองตัวเลย

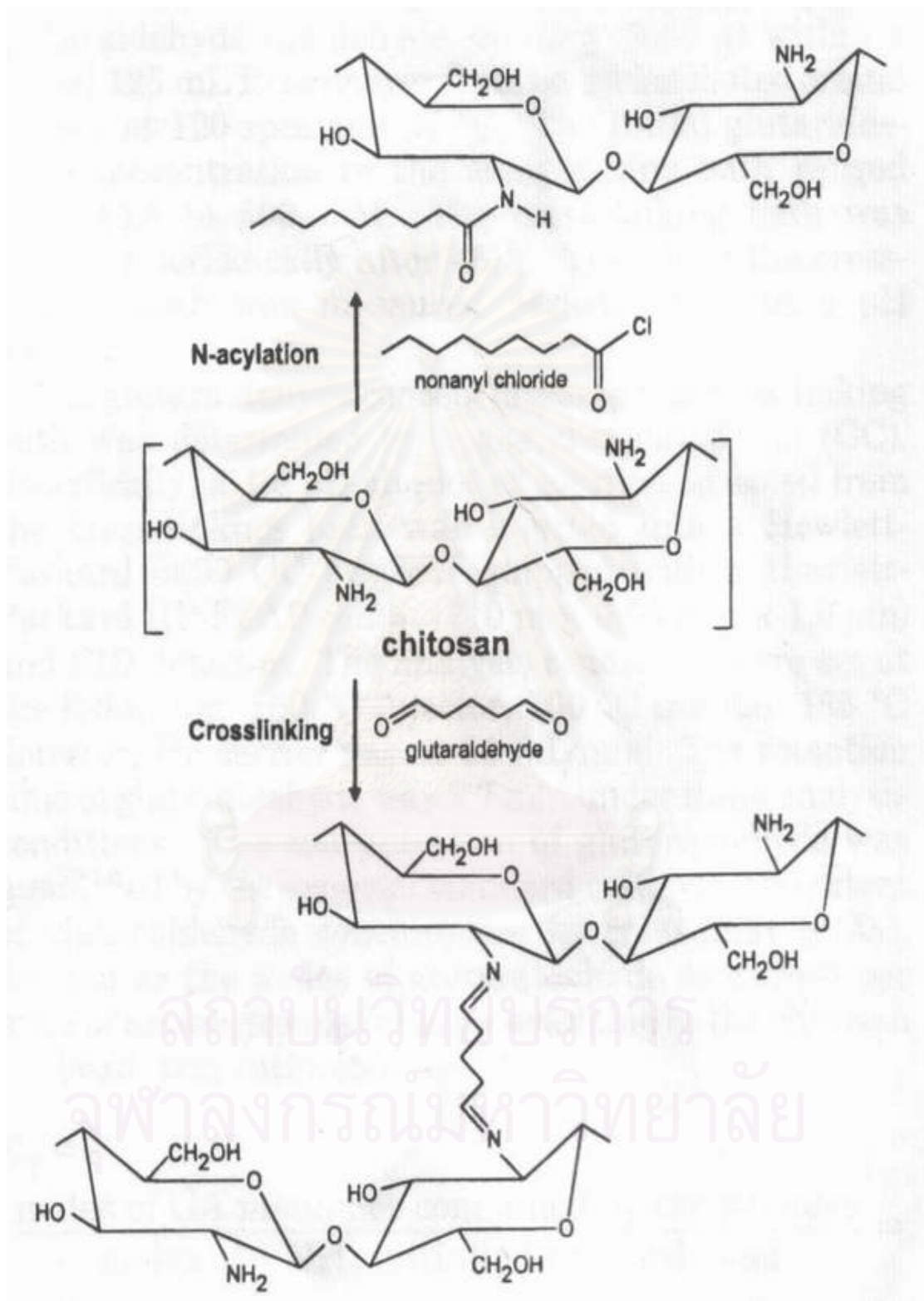
3. สมบัติทางกล

โพลีเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายหรือเกิดน้อยจะทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติคล้ายยาง (Elastomer) คือมีความอ่อนนุ่ม (Soft) และยืดหยุ่นได้ (Flexible) แต่สำหรับโพลีเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายมาก จะทำให้โพลีเมอร์มีลักษณะแข็ง (Rigid) และเปราะ (Brittle) เนื่องจากโพลีเมอร์มีโครงร่างสามมิติของพันธะโควาเลนต์ ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวอย่างอิสระของสายโซ่โมเลกุลนั้นถูกจำกัด

2.4.4 สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (Cross-linking agent)

1. สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ไกลออกซอล (Glyoxal) Succinaldehyde 1,10-decanedial Trichlorotriazine อีพิฮาโลไฮดริน (Epihalohydrin) Benzoquinone และ Bisepoxiranes ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กนี้จะเกิดภายในโครงสร้างของโคโตแซน โดยโมเลกุลเหล่านี้จะสามารถแพร่ผ่าน (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างของโคโตแซนได้

2. สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่อัลดีไฮด์มากกว่า 1 หมู่ (Polyaldehyde) เช่น Dextran Dialdehyde, Starch dialdehyde, Dialdehyde of Carageenan และ Dialdehyde of Alginic Acid สารประกอบเหล่านี้เป็น Oxidized Polysaccharide Polyaldehyde ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของโคโตแซน สารเหล่านี้จะมีสายโซ่โมเลกุลยาว ทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของโคโตแซนได้



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาอะซิไทเลชันและการเกิดโครงร่างตาข่ายระหว่างกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่เอมีนบนไคโตแซน (Hsien และ Rorrer, 1997)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Park และคณะ, (1984) ได้ศึกษาเกี่ยวกับแรงดึงดูดภายในโมเลกุลระหว่างไคโตแซนแบบผงและไอออนของโลหะทองแดง (Cu^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ในสารละลายโดยใช้เครื่อง Spectroscopic และ Viscosity Measurement พบว่าการเกาะติดของทองแดงบนไคโตแซนเกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ 5 และการเกิดคีเลชันระหว่างโมเลกุล และภายในโมเลกุลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของทองแดงและไคโตแซนที่ทำการวิเคราะห์และการเกิดคีเลชันระหว่างโมเลกุลของนิกเกิลเกิดที่พีเอช 6.2

Kurita และคณะ, (1986) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายของไคตินที่ละลายน้ำได้ (Water-Soluble Chitin) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย พบว่าไคตินที่เกิดโครงร่างตาข่ายสามารถนำไปดูดซับโลหะที่เป็นไอออนบวกได้ดี และการเกิดโครงร่างตาข่ายนั้นสามารถลดความเป็นผลึก (Crystallinity) ของไคโตแซน ทำให้มีการดูดซับไอออนของโลหะได้ดีเช่นกัน

Hsien และ Rorrer (1995) ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการ Acetylation และการทำโครงร่างตาข่ายของไคโตแซนที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุ และความสามารถในการดูดซับแคดเมียมซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทำโครงร่างตาข่ายของไคโตแซนแบบเม็ด (Gel Beads) ด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ ตามด้วยกระบวนการ Freeze-drying จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของไคโตแซนที่ได้มองเห็นได้ชัดเจน กล่าวคือการทำ Cross-linking ให้ได้ไคโตแซนขนาด 3 มิลลิเมตร และมี 7% N-C₉ Acylated ด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น 250 มิลลิโมล ตามด้วยกระบวนการ Freeze-drying จะทำให้ไคโตแซนที่ได้มีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายใน 224 ตารางเมตรต่อกรัม และไม่สามารถละลายในสภาวะที่มีพีเอชต่ำๆ ได้

Hsien และ Rorrer (1997) ได้ทำการศึกษาไคเนติกของไคโตแซนแบบเม็ดที่ประกอบเป็นโครงร่างตาข่ายแบบ Heterogenous ด้วย กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ในการดูดซับแคดเมียม ในการทดลองได้นำสารละลายไคโตแซน 5% โดยน้ำหนักมาผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปของ Gel Bead จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ (Aqueous Glutaraldehyde, GA) เพื่อให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย และนำไปผ่านกระบวนการ Freeze-drying เพื่อให้ไคโตแซนแข็งตัว โดยมีขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร เมื่อนำไปดูดซับแคดเมียม พบว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของ Cross-linked Chitosan Gel Bead เมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัว

ลดลงแบบ Exponential จาก 250 เป็น 100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมไคโตแซน ในขณะที่ขอบเขตของโครงร่างตาข่าย (Extent Cross-linking) เพิ่มขึ้นจากศูนย์เป็น 1.3 โมลกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้ต่อโมลเอมีน นอกจากนี้ Cross-linking ของหมู่เอมีน (-NH₂) บนไคโตแซนแบบเม็ดที่มี GA ทำให้เม็ดไคโตแซนไม่ละลายในสารละลายกรด

Juang และ Ju (1997) ได้ทำการศึกษาสภาวะสมดุลของการดูดซับทองแดง (Cu²⁺) ด้วยไคโตแซนแบบเม็ดที่มีโครงร่างตาข่ายแบบโพลีอะมิเนตที่เตรียมด้วย โพลีเอธิลีนไมด์ (Poly-Ethylenimine, PEI) โดยมีอีดีทีเอ (EDTA, Ethylenediaminetetraacetic acid) ที่มีความเข้มข้นโมลาร์เท่ากันเป็นสารคีเลต พบว่าที่สภาวะสมดุลย์ ทองแดงจะถูกดูดซับได้น้อยเมื่อพีเอชต่ำกว่า 3 และจะถูกดูดซับมากขึ้นเมื่อมี พีเอช อุณหภูมิ มวลโมเลกุลของ PEI และความเข้มข้นสารละลาย Cu-EDTA เพิ่มขึ้น โดยข้อมูลมีความเหมาะสมกับ BET Isotherm ยกเว้นเมื่อความเข้มข้นทองแดงที่สภาวะสมดุลมีค่ามากกว่า 6 โมลต่อลูกบาศก์เมตร

Takatsuji และ Yoshida (1998) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับกรดอินทรีย์ด้วย Polyaminated Highly Porous Chitosan หรือ Chitopearl CCS เปรียบเทียบกับเรซินกรดอ่อนที่ใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้กรดอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดมาลลิก (Malic acid) และกรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งกรดอินทรีย์ดังกล่าวถูกดูดซับบนไคโตแซนด้วยปฏิกิริยาของกรดและด่าง จากการทดลองพบว่าไคโตแซนสามารถดูดซับกรดอินทรีย์ได้ดีเหมือนกับเรซิน และที่ค่าพีเอชสูงๆ (ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ต่ำๆ) ไคโตแซนสามารถดูดซับกรดอินทรีย์ได้มากกว่าเรซิน

Ngah และ Liang (1999) ได้ทำการศึกษาการดูดซับทอง (Au³⁺) ด้วยไคโตแซนแบบเม็ดและ N-Carboxymethyl Chitosan (NCCM) พบว่าความสามารถในการดูดซับทองเมื่อใช้ไคโตแซนแบบเม็ดมีค่าเท่ากับ 30.95 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตแซน และมีค่าการดูดซับสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 4.0 แต่เมื่อทำการสังเคราะห์ไคโตแซนดังกล่าวให้กลายเป็น N-Carboxymethyl Chitosan (NCCM) พบว่าสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้เป็น 33.90 มิลลิกรัมต่อกรัม NCCM โดยมีค่าการดูดซับสูงสุดอยู่ที่พีเอชเท่ากับ 6.0

Wu และคณะ, (1999) ได้ทำการศึกษาสมดุลย์ของการดูดซับทองแดง (Cu²⁺) ในสารละลายที่มีสารคีเลต 4 ชนิด ได้แก่ อีดีทีเอ (EDTA, Ethylenediaminetetraacetic acid) กรดซิตริก (Citric acid) กรดทาทาริก (Tartaric acid) และโซเดียมกลูโคเนต (Sodium Gluconate) เมื่อใช้

ไคโตแซนแบบเกล็ดพบว่า ไคโตแซนมีความสามารถในการดูดซับทองแดงได้ดีเท่ากับ 2.5 mol/kg เมื่อสารละลายมีสารคีเลตจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้น ไฮเดียมกลูโคเนต ที่มีความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อย โดยพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงสำหรับอีดีทีเอ อยู่ในช่วง 3.1-4.2 กรดซิตริก อยู่ในช่วง 5.0-5.8 กรดทาทาริก อยู่ในช่วง 5.0-6.0 และไฮเดียมกลูโคเนต อยู่ในช่วง 5.2-5.8 ทั้งนี้การดูดซับเหมาะสมกับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ที่แต่ละค่าพีเอชที่เหมาะสม และความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของทองแดงเมื่อมีอีดีทีเอ กรดซิตริก กรดทาทาริก และไฮเดียมกลูโคเนต เป็นสารคีเลต มีค่าเท่ากับ 0.59 2.60 4.29 และ 2.48 โมลต่อกิโลกรัมตามลำดับ

Yunhua และคณะ, (2000) ทำการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของไอออนโลหะ 60 ชนิด ความเข้มข้น 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายซึ่งเป็นกรดทางการค้าที่เรียกว่า Chitopearl AI-01 โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า ไคโตแซนที่ใช้สามารถดูดซับไอออนประจุลบเช่น ออกซิแอนไอออน (Oxoanions) หรือไอออนของสารเชิงซ้อนจำพวกคลอไรด์ (Chloro Complex Anions) บนโลหะได้หลายชนิด เช่น Ti V Mo W Ga Bi Au(III) Pt(II) และPd(II) ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange Mechanism) และสามารถดูดซับไอออนโลหะบางชนิดได้ด้วยกลไกของการเกิดคีเลชัน (Chelating Mechanism)

Jaafari และคณะ, (2001) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดไนเตรตที่ปนเปื้อนในน้ำผิวดินและน้ำบาดาลโดยใช้ Protonated Cross-link Chitosan Gel Bead ที่ได้จากการนำไคโตแซนแบบผงมาละลายกับกรดอะซิติกเข้มข้น 3.5% โดยมวลแล้วทำการผ่านสารละลายเบสแก่เพื่อให้ได้ไคโตแซนที่อยู่ในรูป Gel Bead จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เพื่อให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย และเมื่อนำไปทดลองดูดซับไนเตรตพบว่า Protonated Cross-link Chitosan Gel Bead สามารถกำจัดไนเตรตได้ด้วยวิธีการลดปริมาณและความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับพีเอช ซึ่งพีเอชที่ 3-5 จะมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด คู่แข่งสำคัญที่จะมาแย่งพื้นที่ในการดูดซับคือฟลูออไรด์ที่มีในน้ำ อย่างไรก็ตามการกำจัดไนเตรตจะเห็นได้ชัดเจนกว่าโดยความสามารถในการดูดซับไนเตรตจะเพิ่มขึ้นตามพีเอช

Schmuhl และคณะ, (2001) ได้ทำการศึกษาการดูดซับของทองแดง (Cu^{2+}) และโครเมียม (Cr^{6+}) ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (Cross-linked Chitosan) ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลาย อีพิฮาโลไฮดริน (Epihalohydrin) และไคโตแซนแบบไม่มีโครงร่างตาข่าย (Noncross-linked Chitosan) เมื่อทำการทดลองกับความเข้มข้นของโครเมียมและทองแดงในช่วง 10-100

มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมของไคโตแซนแบบไม่มีโครงร่างตาข่าย (Noncross-linked Chitosan) มีค่า 78 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตแซน และความสามารถในการดูดซับโครเมียมของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (Cross-linked Chitosan) มีค่า 50 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตแซน ซึ่งอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm) สำหรับการดูดซับของทองแดง พบว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไคโตแซนทั้งสองชนิด ประมาณได้ว่ามีค่ามากกว่า 80 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตแซนเช่นเดียวกัน ซึ่งอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงมีค่าเท่ากับ 5 และ ในช่วง 3-5 ตามลำดับ

รัตเกล้า (2539) ศึกษาการเกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย พบว่าที่ความเป็นกรดต่างของสารละลายไคโตแซนเท่ากับ 4 และที่ความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์ เท่ากับ 3.0 ไมโครโมลต่อไคโตแซน 1 กรัม เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย

รามนรี (2543) ได้ทำการศึกษาภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูในรูปอาร์ซีนีต [As(V)] ด้วยไคโตแซนแบบเม็ดที่เตรียมจากผงไคโตแซน พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการใช้ไคโตแซนแบบเม็ดดูดซับอาร์ซีนีตในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ การใช้ปริมาณไคโตแซน 0.5 กรัม ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที พีเอช 6 ภายในเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง สามารถดูดซับสารหนูได้ 0.1472 มิลลิกรัมต่อกรัม การเพิ่มความแรงไอออน (Ionic Strength) ด้วยโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) และการมีแอนไอออนอื่น (SO_4^{2-}) ไม่มีผลต่อการดูดซับสารหนูในรูปของสารละลายอาร์ซีนีตของไคโตแซนแบบเม็ด

ปรีดา (2544) ทำการศึกษาผลของความแรงไอออนและสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบผง พบว่าเมื่อพีเอชในการทดลองสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของไคโตแซนจะเพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการดูดซับมากที่สุดอยู่ที่พีเอชเริ่มต้น 8 โดยที่ในการทดลองใช้พีเอชเริ่มต้นในช่วง 4 – 8 และการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของไคโตแซน (Adsorption Capacity) เพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมอีดีทีเอซึ่งเป็นสารคีเลตลงไป สารละลายตะกั่ว พบว่าการดูดซับที่พีเอชต่างๆ เปลี่ยนไป โดยที่ความสามารถในการดูดซับที่พีเอชสูงกว่า 5 มีค่าลดลง เนื่องจากตะกั่วสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอทำให้รูปแบบของตะกั่วในน้ำเปลี่ยนจากไอออนตะกั่วที่มีประจุเป็นบวก (Pb^{2+}) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วอีดีทีเอที่มีประจุเป็นลบ ($\text{Pb}(\text{EDTA})^{2-}$) โดยที่ตะกั่วทั้งสองรูป

แบบมีกลไกในการดูดซับด้วยไคโตแซนที่แตกต่างกัน และการเติมโซเดียมไนเตรดลงไปในการละลายตะกั่วเพื่อเพิ่มความแรงไอออนไม่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว แต่จะมีผลต่อสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับอีดีทีเอโดยทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงมาก

อุบลรัตน์ (2544) ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผากระดูกโคกระบือที่อุณหภูมิ 600 800 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 10 และ 12 ชั่วโมง โดยทำการทดลองทั้งแบบแบดซ์และแบบคอลัมน์ ซึ่งสำหรับผลการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้คอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 เซนติเมตร บรรจุถ่านกระดูกปริมาณ 2 กรัมและทำการทดลองที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เก็บน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทุกๆ 12 ชั่วโมง พบว่าสำหรับการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 85.28 และ 63.08 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกและสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 4937 และ 1851 เท่าของปริมาตรเบด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้กระทำที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 แผนการวิจัย

- 3.1.1 การเตรียมเครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3.1.2 การเตรียมสารดูดซับสำหรับการวิจัย
- 3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
- 3.1.4 การดำเนินการวิจัย
- 3.1.5 การวิเคราะห์ผลการวิจัยและสรุปผล

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำศึกษาการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายโดยทำการทดลองทั้งแบบแบตช์และคอลัมน์ และแบ่งการขั้นตอนวิจัยได้ดังนี้

- 3.2.1 การเตรียมไคโตแซนแบบเม็ด
- 3.2.2 การเตรียมโครงร่างตาข่ายให้กับไคโตแซนและทดสอบสมบัติทางกายภาพ
- 3.2.3 การศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย
- 3.2.4 การศึกษาพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย
- 3.2.5 การศึกษาปริมาณไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว
- 3.2.6 การศึกษาผลของอีดีทีเอ เอ็นทีเอ และกรดทาทาริกต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย
- 3.2.7 การศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายโดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยสำหรับแต่ละขั้นตอนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1-3.5

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการ
ดูซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา	
ตัวแปรคงที่		
1. ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	10	มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปริมาณของสารละลายตะกั่ว	25	มิลลิลิตร
3. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต	0.05	มิลลิโมล
4. ปริมาณสารละลายโซเดียมไนเตรต	25	มิลลิลิตร
5. ปริมาณไคโตแซนในน้ำเสียสังเคราะห์	0.1	กรัม
6. ความเร็วรอบในการเขย่า	200	รอบต่อนาที
7. พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	6	
ตัวแปรอิสระ		
1. เวลาสัมผัส	1, 5, 10, 15, 30 นาที และ 1, 2, 6, 12, 24, 48 ชั่วโมง	

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาพีเอช และความเข้มข้นของสาร
ละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา	
ตัวแปรคงที่		
1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต	0.05	มิลลิโมล
2. ปริมาณสารละลายโซเดียมไนเตรต	25	มิลลิลิตร
3. ปริมาณไคโตแซนในน้ำเสียสังเคราะห์	0.1	กรัม
4. ความเร็วรอบในการเขย่า	200	รอบต่อนาที
5. เวลาสัมผัส	เลือกค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.2.3	
ตัวแปรอิสระ		
1. ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	0, 1, 3, 5, 10	มิลลิกรัมต่อลิตร
2. พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	4, 6, 8, 10	

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาปริมาณโคโตแซนแบบโครงร่าง
ตาข่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา	
ตัวแปรคงที่		
1. ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	10	มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปริมาณของสารละลายตะกั่ว	25	มิลลิลิตร
2. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต	0.05	มิลลิโมล
2. ปริมาณสารละลายโซเดียมไนเตรต	25	มิลลิลิตร
3. พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	เลือกค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.2.4	
4. ความเร็วรอบในการเขย่า	200	รอบต่อนาที
5. เวลาสัมผัส	เลือกค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.2.3	
ตัวแปรอิสระ		
1. ปริมาณโคโตแซนในน้ำเสียสังเคราะห์	0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1 กรัม	

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาผลของสารคีเลตที่มีต่อความ
สามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา	
ตัวแปรคงที่		
1. ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	10	มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปริมาณของสารละลายตะกั่ว	15	มิลลิลิตร
3. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต	0.05	มิลลิโมล
4. ปริมาณสารละลายโซเดียมไนเตรต	15	มิลลิลิตร
5. ความเร็วรอบในการเขย่า	200	รอบต่อนาที
6. เวลาสัมผัส	เลือกค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.2.3	
7. ปริมาณโคโตแซนในน้ำเสียสังเคราะห์	เลือกค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3.2.5	
ตัวแปรอิสระ		
1. พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	4, 6, 8, 10	
2. ปริมาณอีดีทีที่ต่อปริมาณตะกั่ว	0.5:1, 1:1, 2:1	โมลต่อโมล
3. ปริมาณเอ็นทีที่ต่อปริมาณตะกั่ว	0.5:1, 1:1, 2:1	โมลต่อโมล
4. ปริมาณกรดทาทาริกต่อปริมาณตะกั่ว	0.5:1, 1:1, 2:1	โมลต่อโมล

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาคอลัมน์เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย

ตัวแปร	ช่วงที่ทำการศึกษา
ตัวแปรคงที่	
1. ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต	0.05 มิลลิโมล
3. เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์	1 เซนติเมตร
3. ความสูงของชั้นไคโตแซน	12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ (ไคโตแซน 5.4 กรัม)
4. อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์	200 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
5. พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	เลือกค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.4
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว	ร้อยละการกำจัด

3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	คุณสมบัติ
1. ไคโตแซนจากบริษัท Seafresh Ltd.	18 mesh
2. ตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$)	Standard Solution
3. อีดีทีเอ ($C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$)	Analytical Reagent Grade
4. เอ็นทีเอ ($C_6H_9NO_6$)	Analytical Reagent Grade
5. กรดทาทาริก ($C_4H_6O_6$)	Analytical Reagent Grade
6. กรดไนตริกเข้มข้น 65% (HNO_3)	Analytical Reagent Grade
7. กลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น 25% ($HOC(CH_2)_3COH$)	Analytical Reagent Grade
8. กรดอะซิติกเข้มข้น 100% (CH_3COOH)	Analytical Reagent Grade
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)	Analytical Reagent Grade
10. โซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$)	Analytical Reagent Grade

ตารางที่ 3.7 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	หมายเหตุ
1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)	Varian Spectr-AA
2. เครื่องเขย่า (Shaker)	Labcon SPO-MP15
3. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)	InoLab pH Level 1
4. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด (Analytical Balance)	Satorius Analytic
5. เครื่อง Total Organic Carbon Analyzer	SHIMADZU : TOC-5000
6. เครื่อง Scanning Electron Microscope	JEOL : JSM-5410LV
7. หลอดทดลอง (Conical Tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร	
8. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter)	
9. กระดาษกรอง GF/C เบอร์ 40	Whatman
10. อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป	

3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

นำสารละลายตะกั่วในเตรตมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเตรียมเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วละลายอยู่ที่ความเข้มข้น 0 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.5.2 การเตรียมโคโคแซนแบบเม็ด (ประยุกต์ตามวิธีของ Juang และ Ju,1997)

- นำโคโคแซนแบบผง 3.5 กรัม มาละลายในสารละลายกรดอะซิติก 3.5% โดยน้ำหนักปริมาตร 93 มิลลิลิตร
- หยดสารละลายโคโคแซนจากข้อ 1 ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 N ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- จะเกิดการฟอร์มตัวของเม็ดโคโคแซนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร
- ทำการกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งพีเอชเป็นกลาง

3.5.3 การเตรียมโครงร่างตาข่ายให้กับโคโตะแซน (ประยุกต์ตามวิธีของ Hsien และ Rorrer, 1997)

1. นำเม็ดโคโตะแซนที่เตรียมได้จำนวน 6.4 กรัม ผสมกับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 25% โดยน้ำหนัก จำนวน 9.6 กรัม ในขวดรูปชมพู่ ปริมาตร 250 มิลลิลิตรที่ปิดสนิท
2. เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
3. กรองเม็ดโคโตะแซนออกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งฟิเอชเป็นกลาง
4. นำโคโตะแซนที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพโดยศึกษาคุณสมบัติดังนี้
 - ความชื้น
 - ลักษณะช่องว่างภายในหรือรูพรุน

3.5.4 การศึกษาภาวะและกลไกที่เหมาะสมในการใช้โคโตะแซนดูดซับตะกั่วในเตรต

3.5.4.1 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 11 หลอดทดลอง
2. เติมสารละลายโซเดียมไนเตรต 0.05 มิลลิโมล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในสารละลายข้อ 1
3. ปรับฟิเอชให้เท่ากับ 6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ กรดไนตริก (HNO₃) เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
4. เติมโคโตะแซน 0.1 กรัม แล้วนำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 5 10 15 นาที 30 นาที และ 1 2 6 12 24 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองโคโตะแซนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่ได้ที่เวลาต่างๆ จำนวน 20 มิลลิลิตร เข้าเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อวัดปริมาณของตะกั่วที่เหลือ
6. เปรียบเทียบผลและเลือกเวลาสัมผัสที่เหมาะสม โดยนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Lead Removal, %) ดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2

$$q = \frac{(c_o - c_e)v}{m} \quad (3.1)$$

$$\% \text{ Lead Removal} = \frac{(C_o - C_e) \times 100}{C_o} \quad (3.2)$$

- โดยที่
- q = ความสามารถในการดูดซับของโคไตเซน (mg/g)
 - C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วในเตรต (mg/L)
 - C_e = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายตะกั่วในเตรต (mg/L)
 - V = ปริมาตรของสารละลาย (L)
 - M = น้ำหนักของโคไตเซน (g)

3.5.4.2 การศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 0 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง ขนาด 50 มิลลิลิตร อย่างละ 4 หลอดทดลอง
2. เติมสารละลายไซเตียมในเตรต 0.05 มิลลิโมล 25 มิลลิลิตร ลงในสารละลายข้อ 1
3. ปรับพีเอชสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 4 6 8 และ 10
4. เติมโคไตเซนจำนวน 0.1 กรัมโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 28 ± 3 องศา ลงไปในหลอดทดลอง
5. นำขวดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมตามผลที่ได้ในข้อ 3.5.4.1
6. กรองโคไตเซนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่ได้ที่พีเอช และความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 20 มิลลิลิตร เข้าเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อวัดปริมาณของตะกั่วที่เหลือ
7. เปรียบเทียบผลแล้วเลือกพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสม

3.5.4.3 การศึกษาปริมาณโคไตเซนที่เหมาะสมในการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตรในหลอดทดลอง ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 6 หลอดทดลอง
2. เติมสารละลายไซเตียมในเตรต 0.05 มิลลิโมล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในสารละลายจากข้อ 1
3. ปรับพีเอชตามผลที่ได้จากข้อ 3.5.4.2
4. เติมโคไตเซน 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 1 กรัม ลงในขวดทดลอง

5. นำขวดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมตามผลที่ได้ในข้อ 3.5.4.1
6. กรองโคโคแชนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่ได้ ที่ปริมาณโคโคแชนต่างๆ จำนวน 20 มิลลิลิตร เข้าเครื่องอะตอมมิคแอบซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อวัดปริมาณของตะกั่วที่เหลือ
7. เปรียบเทียบผลแล้วเลือกปริมาณโคโคแชนที่เหมาะสมในการดูดซับ

3.5.4.4 การศึกษาผลของอีดีทีเอ เอ็นทีเอ และทาทาริก ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 3 ชุด ชุดละ 15 หลอดทดลอง
2. เติมสารละลายไซเดียมไนเตรต 0.05 มิลลิโมล 15 มิลลิลิตร ลงในสารละลายข้อ 1
3. เติมสารละลายอีดีทีเอที่มีอัตราส่วนโมลต่อโมลเท่ากับ 1:0.5 เข้มข้น 36 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1:1 เข้มข้น 72 มิลลิกรัมต่อลิตร และ อัตราส่วน 1:2 เข้มข้น 144 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างละ 15 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองชุดที่ 1
4. เติมสารละลายเอ็นทีเอ ที่มีอัตราส่วนโมลต่อโมลเท่ากับ 1:0.5 เข้มข้น 18.5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1:1 เข้มข้น 37 มิลลิกรัมต่อลิตร และ อัตราส่วน 1:2 เข้มข้น 74 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างละ 15 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองชุดที่ 2
5. เติมสารละลายกรดทาทาริก ที่มีอัตราส่วนโมลต่อโมลเท่ากับ 1:0.5 เข้มข้น 14.5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน 1:1 เข้มข้น 29 มิลลิกรัมต่อลิตร และ อัตราส่วน 1:2 เข้มข้น 58 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างละ 15 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองชุดที่ 3
6. ปรับพีเอชของสารละลายแต่ละชุดให้เท่ากับ 4 6 8 และ 10 จากนั้นเติมโคโคแชนตามผลที่ได้จากข้อ 3.5.4.3
7. นำขวดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมตามผลที่ได้ในข้อ 3.5.4.1
8. กรองโคโคแชนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่ได้ จำนวน 20 มิลลิลิตร เข้าเครื่องอะตอมมิคแอบซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อวัดปริมาณของตะกั่วที่เหลือ
9. เปรียบเทียบผลของอีดีทีเอ เอ็นทีเอ และกรดทาทาริก ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยโคโคแชน

3.4.4.5 การศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และไซเตียมไนเตรต 0.05 มิลลิโมล มาปรับพีเอชให้เท่ากับค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.5.4.2
2. ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้เข้าทางด้านบนของคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ยาว 50 เซนติเมตร โดยบรรจุโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายจำนวน 5.4 กรัม (ความสูงของโคโตแซนเป็น 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์) ด้วยอัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคำนวณได้จากผลของการทดลองที่ 3.5.4.1
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ โดยนำมาหาความเข้มข้นของตะกั่วโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์
4. เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงยุติการทดลอง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เตรียมได้

จากการศึกษาคุณสมบัติของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เตรียมจากโคโตแซนแบบผง จนได้ลักษณะเป็นโคโตแซนเม็ดแล้วจึงนำมาเติมสารเชื่อมโยงเพื่อให้ได้โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 ซึ่งได้ทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture content, %) และการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM, Scanning Electron Microscope) ของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เตรียมได้ โดยเตรียมตัวอย่างด้วยการทำให้แห้งที่จุดวิกฤติ (Critical Point Drying, CPD) ซึ่งการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนและวิธีการเตรียมตัวอย่างแสดงอยู่ในภาคผนวก ฎ ได้ผลการศึกษาดังนี้ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของโคโตแซนได้ผลมีค่าเท่ากับ 90.81% และจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนพบว่าปริมาณช่องว่างภายในโครงสร้างหรือรูพรุนของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายมีจำนวนมากกว่าโคโตแซนทั้งแบบผงและแบบเม็ด ดังรูปที่ 4.4-4.9

ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของโคโตแซน แสดงให้เห็นว่าเม็ดโคโตแซนสามารถเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้ 90.81% ทั้งนี้ความสามารถในการเก็บกักน้ำมีความสัมพันธ์กันกับการพองตัวของเม็ดโคโตแซนดังจะสังเกตได้จากการทดลอง เมื่อนำโคโตแซนไปดูดซับสารละลายตะกั่วพบว่าโคโตแซนมีการพองตัวขึ้นเล็กน้อย และที่ความชื้นสูงๆ โคโตแซนจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก เนื่องจากสมบัติการชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของโคโตแซนจึงสามารถดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวได้เพื่อลดความเข้มข้นภายในตัวให้เกิดความสมดุลกับความเข้มข้นภายนอก ซึ่งเป็นการทำให้ช่องว่างภายในหรือรูพรุน (Porous) ขยายตัวมากขึ้นตามไปกับการพองตัวของเม็ดโคโตแซนด้วย และความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างของโคโตแซนนี้ ยังมีประโยชน์ในแง่ของการนำสารละลายโลหะเคลื่อนที่ผ่านเข้าและออกภายในรูพรุนได้ดีอีกด้วย โดยมีความสำคัญต่อกลไกการดูดซับไอออน ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะกับหมู่อะมิโนอิสระภายในโครงสร้างของโคโตแซนนั่นเอง

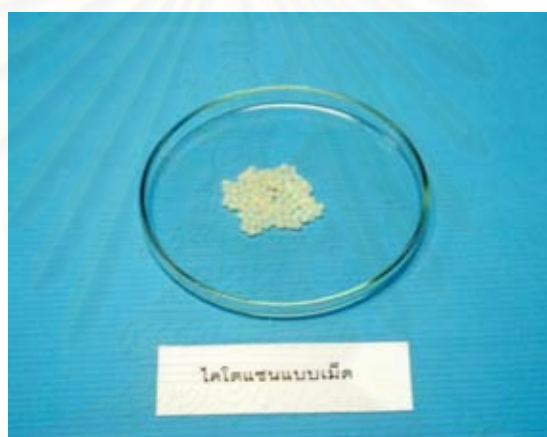
ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM, Scanning Electron Microscope) แสดงให้เห็นถึงปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนที่มากกว่าโคโตแซนแบบผงและแบบเม็ดด้วยปริมาณรูพรุนที่มีจำนวนมากกว่า ภายในโครงสร้างของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายซึ่งสนับสนุนคุณสมบัติในด้านการใช้งานที่ดีกว่าโคโตแซนแบบผงและแบบเม็ด นอกจากนี้โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายยังละลายได้

ยากในสารละลายกรด ต่างกับไคโตแซนที่ไม่ได้ผ่านการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (Non-cross-linked Chitosan) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและมีความได้เปรียบมากกว่าในการดูดซับโลหะ (Yunha และคณะ, 2000) และเนื่องจากโครงสร้างสายโพลิเมอร์ของไคโตแซนขดตัวเป็นทรงกลม (Sphere) อย่างหนาแน่น มีลักษณะการขดตัวเป็นแบบวง (Random Coil) และแบบแท่ง (Rod) การนำไคโตแซนมาละลายในสารละลายกรดที่พีเอชน้อยกว่า 6 จะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่ฟังก์ชันอื่นแตกตัวออก หมู่อะมิโนในสายโมเลกุลจะรับโปรตอน (Protonation) แล้วอยู่ในรูปประจุบวก (Protonated, $-NH_3^+$) ทำให้สายโพลิเมอร์ที่ขดเป็นวงคลายตัวออกและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และเมื่อหยดสารละลายไคโตแซนที่มีความเข้มข้น 3.5% โดยน้ำหนักลงไป ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มัล จะได้เม็ดไคโตแซนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ในการทดลองง่ายกว่าแบบผง เนื่องจากไคโตแซนแบบผงจะติดอยู่ตามเครื่องแก้วที่ใช้ทำการทดลอง และแยกออกจากสารละลายโลหะได้ยากกว่าเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแล้ว เมื่อทำการเพิ่มปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนของไคโตแซนเม็ดด้วยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) ภายในโครงสร้างของไคโตแซน ด้วยการเติมสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น 25% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายโดยโมเลกุลของกลูตารัลดีไฮด์จะแพร่ผ่าน (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างของไคโตแซนเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของไคโตแซนด้วยพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งโพลิเมอร์จะมีสายโซ่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือไอออนิก เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครงร่างตาข่ายแบบสามมิติ (Three-Dimensional Network) ทำให้ไคโตแซนที่ได้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานมากกว่าไคโตแซนแบบอื่นคือไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายจะไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายแต่จะเกิดการพองตัว เนื่องจากตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างของตัวโพลิเมอร์ได้ ทำให้ตัวทำละลายไม่เข้าไปเกิดผลกระทบต่อพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่

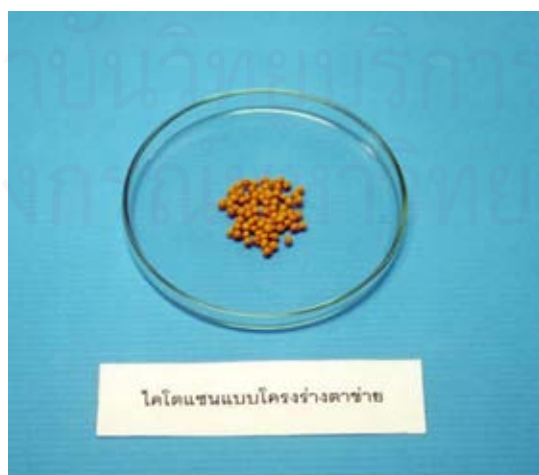
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



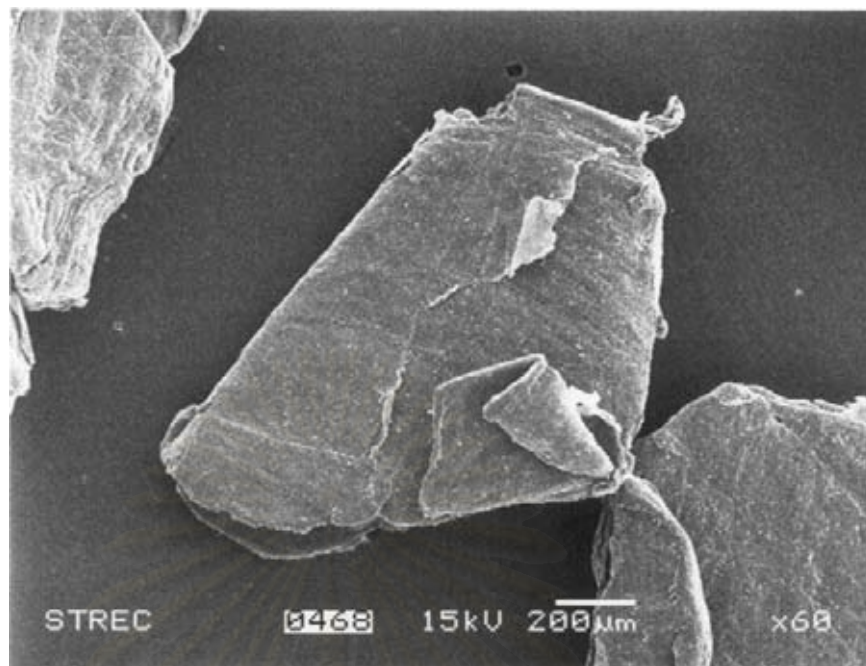
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของโคโตแซนแบบผงขนาด 18 เมช



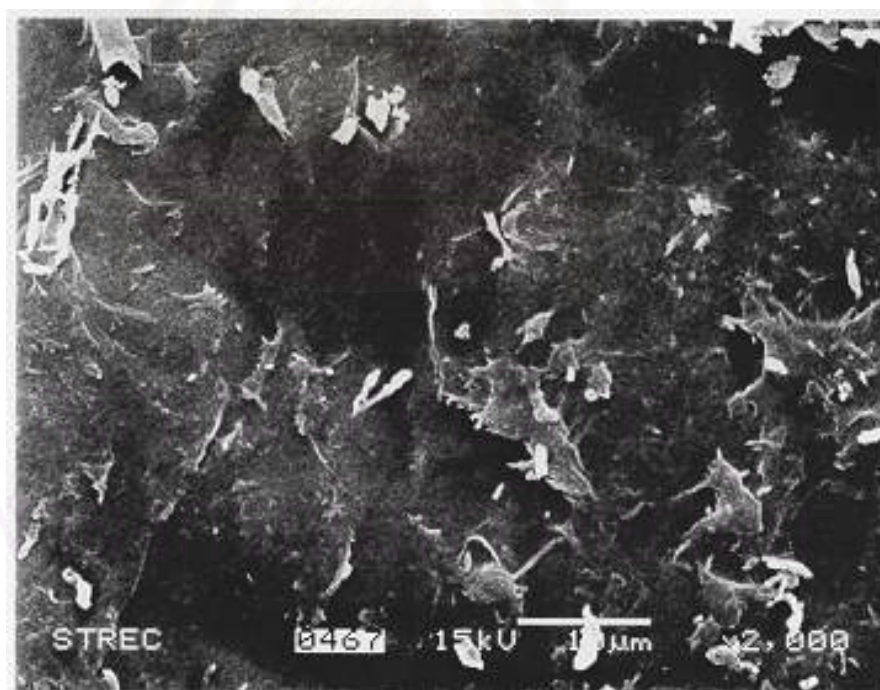
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของโคโตแซนแบบเม็ด



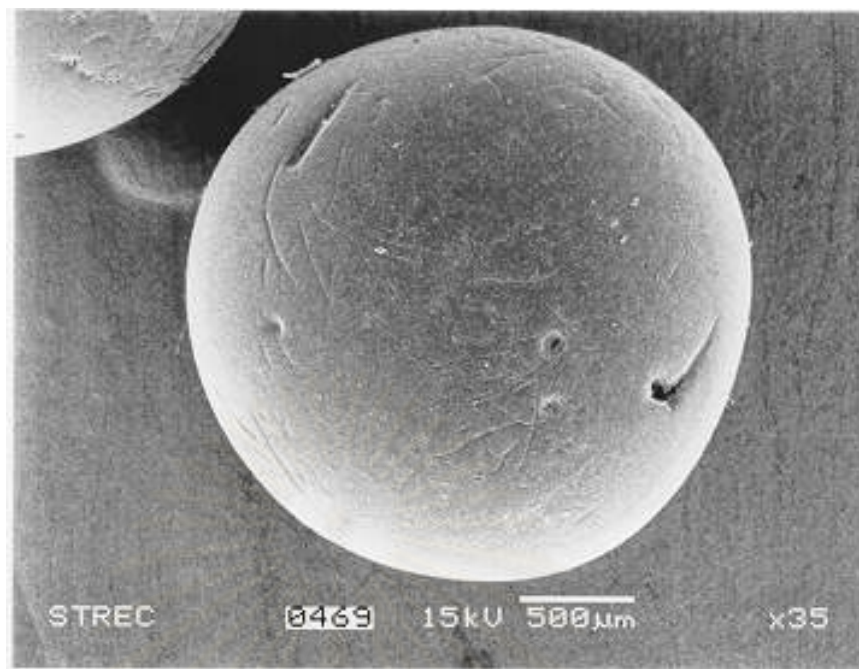
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย



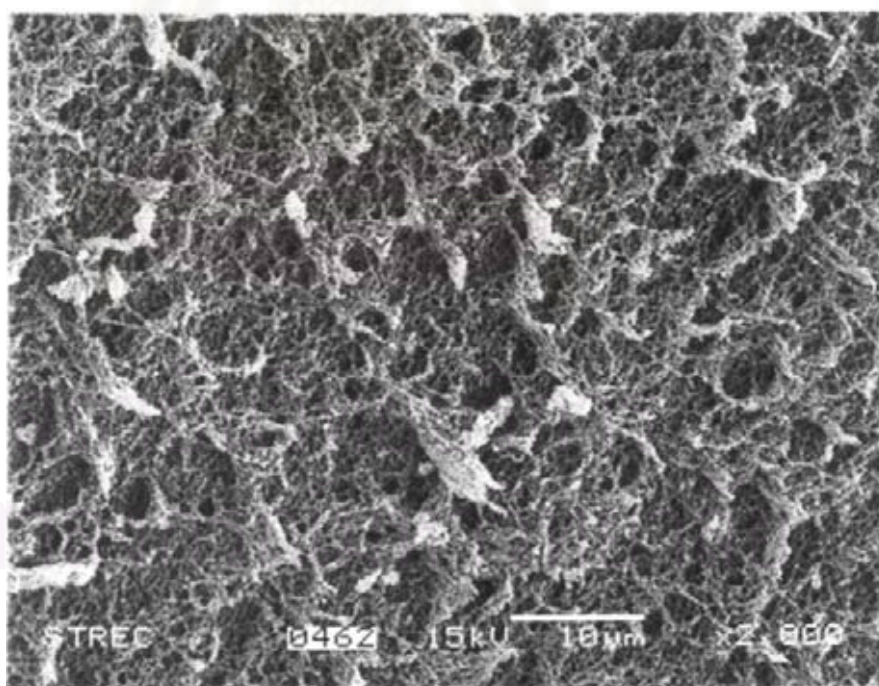
รูปที่ 4.4 ไคโตแซนแบบผงที่กำลังขยาย 60 เท่า



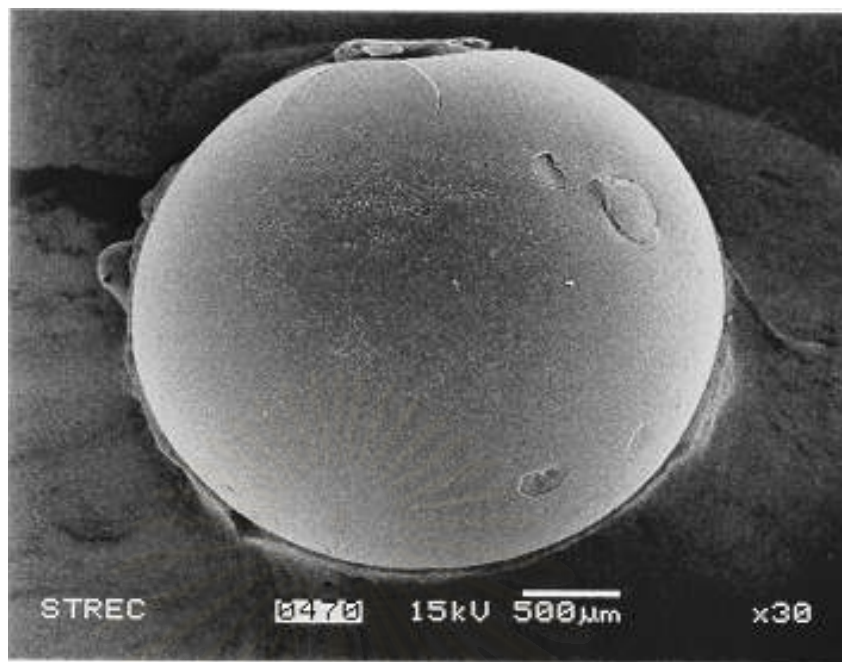
รูปที่ 4.5 ไคโตแซนแบบผงที่กำลังขยาย 2000 เท่า



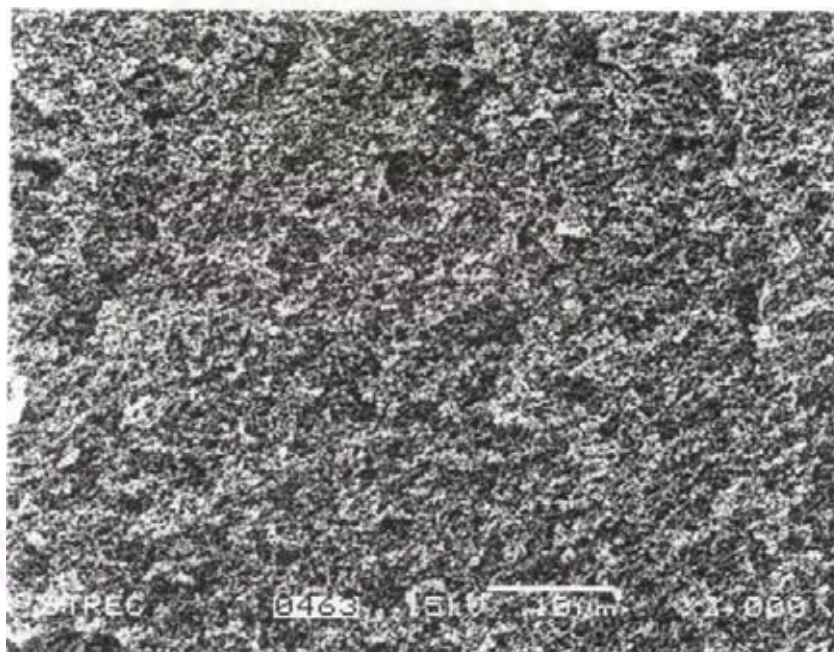
รูปที่ 4.6 ไคโตแซนแบบเม็ดที่กำลังขยาย 35 เท่า



รูปที่ 4.7 ไคโตแซนแบบเม็ดที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูปที่ 4.8 ไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่ายที่กำลังขยาย 30 เท่า

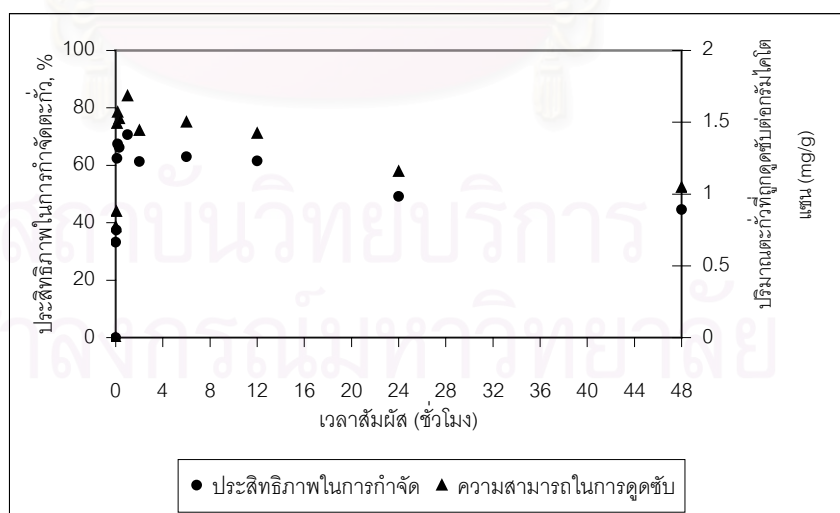


รูปที่ 4.9 ลักษณะรูพรุนของไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่ายที่กำลังขยาย 2000 เท่า

4.2 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในเตรต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย 0.1 กรัม ปรับให้สารละลายตะกั่วมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 และนำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 5 10 15 30 นาที และ 1 2 6 12 24 และ 48 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่ช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.10 พบว่าในช่วงเวลาตั้งแต่ 1-10 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับในรูปร้อยละการดูดซับของตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วคือ 33.17%-62.43% และมีค่าสูงขึ้นอีกเล็กน้อยในช่วงเวลา 15-30 นาที ซึ่งเท่ากับ 67.47% และ 66.23% ส่วนที่เวลา 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีค่าสูงที่สุดคือ 70.73% หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในช่วงเวลา 2-48 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าประมาณ 61-63% สำหรับช่วงเวลา 2-12 ชั่วโมง ส่วนในช่วงเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจะมีค่าลดลงเหลือ 49.17% และ 44.63% ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลา 12-48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของไคโตแซนมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงเลือกเวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมงเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนมีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนที่ค่าพีเอชต่างๆ

4.3 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม เมื่อนำไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายมาดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้น 0 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร โดยปรับให้มีพีเอชเริ่มต้น 4 6 8 และ 10 จากนั้นเติมไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย 0.1 กรัมลงในแต่ละหลอดทดลองและนำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมงซึ่งเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.4.1 แสดงดังรูปที่ 4.11-4.12

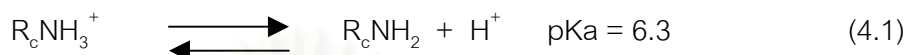
จากการทดลองเมื่อพิจารณาผลของพีเอชพบว่า พีเอชของสารละลายตะกั่วมีค่าสูงขึ้นหลังจากเกิดการดูดซับ โดยค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4.64-5.23 6.54-7.34 7.32-8.05 และ 9.66-9.81 สำหรับพีเอชเริ่มต้น 4 6 8 และ 10 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นในทุกช่วงพีเอชที่ทำการศึกษา เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมด มาทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด และปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายพบว่า ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงขึ้นของสารละลายตะกั่วที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากัน เช่นที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมีค่า 76.67% 85.78% 85.93% และ 87.1% ตามลำดับ และปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนมีค่า 0.35, 1.18, 2.01 และ 4.05 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซนตามลำดับ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับประสิทธิภาพในการกำจัดและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายพบว่า พีเอชมีผลต่อทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดและสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยที่พีเอชสูงไคโตแซนจะสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าที่พีเอชต่ำ และที่พีเอชประมาณ 6-10 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วค่อนข้างคงที่ เช่นที่ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่พีเอชเริ่มต้น 4 6 8 และ 10 มีค่า 56.33% 76.67% 79.33% และ 78.66% ส่วนปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนมีค่า 0.26 0.35 0.35 และ 0.38 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน

ทั้งนี้เนื่องจากไคโตแซนมีคุณสมบัติเป็นโพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer) และมีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) อิสระบนสายโพลีเมอร์เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับไอออนโลหะ ดังสมการที่ 4.1 หมู่อะมิโนในไคโตแซนมีสมบัติเป็นต่างอ่อน มีอิเล็กตรอนคู่ว่าง (Unshared Pair of Electron) อยู่ในรูปไม่มีประจุ (Unprotonated, $-NH_2$) ทำให้สามารถสร้างพันธะกับโปรตรอน (H^+) หรือดูดซับ

ไอออนโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ โดยที่พีเอชสูงไอออนบวกจะสามารถจับกับหมู่อะมิโนในโครงสร้างของโคโคแซนซึ่งอยู่ในรูปไม่มีประจุ (Unprotonated, $-NH_2$) ได้ดีกว่า ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์คู่ว่างของหมู่อะมิโนพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ ในทางตรงข้ามที่พีเอชต่ำ โคโคแซนจะอยู่ในรูปมีประจุ (Protonated, $-NH_3^+$) ทำให้โคโคแซนดูดซับโลหะที่เป็นไอออนลบได้ดีกว่า ดังสมการที่ 4.1



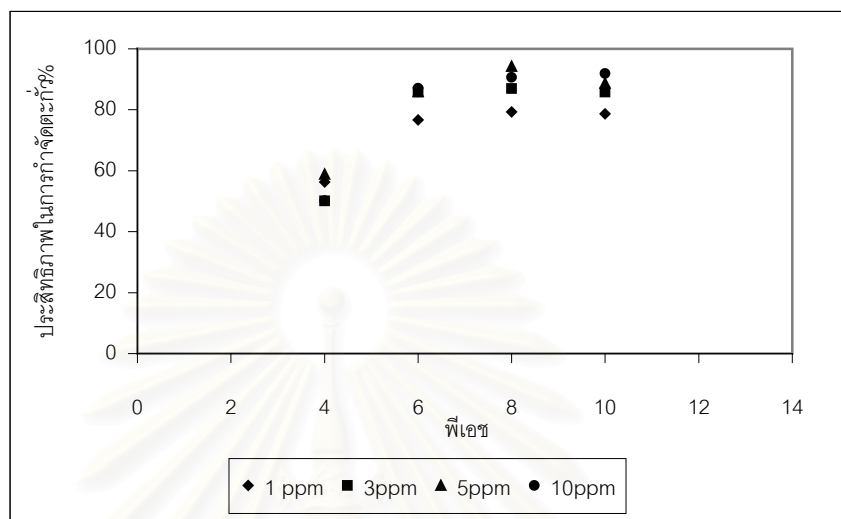
($R_cNH_3^+$ หมายถึงโคโคแซนและ $R_cNH_2 + H^+$ หมายถึงโคโคแซนที่ทำปฏิกิริยาไฮโดรเจนไอออนหรือไอออนโลหะที่หมู่อะมิโน)

จากผลการทดลองยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพีเอช เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง โดยเมื่อปรับให้สารละลายตะกั่วมีพีเอชเริ่มต้น 4 พบว่าพีเอชหลัง 4 ชั่วโมงมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 4.64-5.23 ในขณะที่ทำการปรับสารละลายตะกั่วให้มีพีเอชเริ่มต้น 6 พบว่าหลังทดลองพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยอยู่ในช่วง 6.54-7.34 และเมื่อปรับพีเอชของสารละลายตะกั่วให้มีค่าเท่ากับ 8 ค่าพีเอช หลังทดลองมีค่าลดลง อยู่ในช่วง 7.32- 7.80 เช่นเดียวกันกับการปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วให้มีค่าเท่ากับ 10 พบว่าพีเอชหลังทดลองมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 9.66-9.81

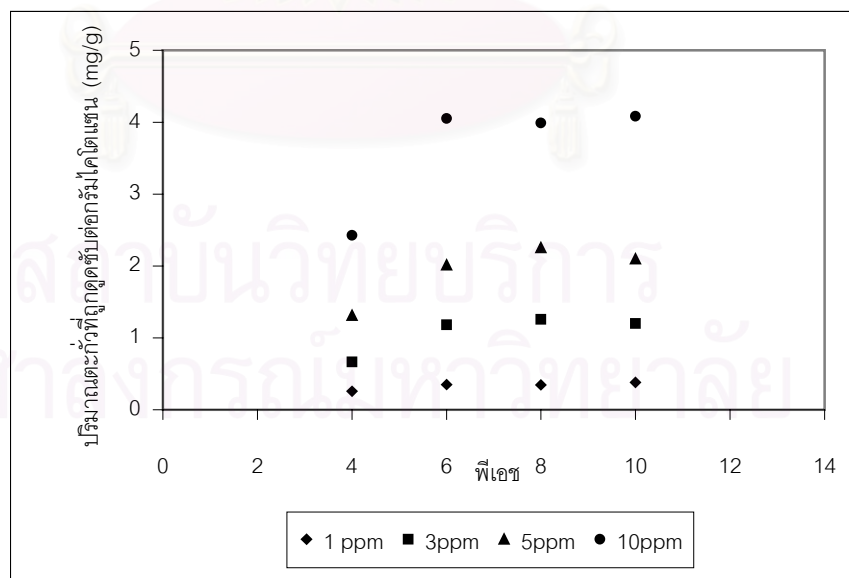
การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชหลังทำการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.1 เช่นเดียวกัน กล่าวคือ โคโคแซนมีคุณสมบัติเป็นสารบัฟเฟอร์ทำให้สามารถปรับสมดุลของค่าพีเอชให้เข้าหาค่า pKa ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.3 ดังนั้นพีเอชเริ่มต้นที่ต่ำกว่าค่า pKa ได้แก่ พีเอช 4 และ 6 หลังทดลองพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนพีเอชเริ่มต้นที่สูงกว่าค่า pKa ซึ่งได้แก่พีเอช 8 และ 10 หลังการทดลองพีเอชจะมีค่าลดลง และพีเอชที่ใกล้เคียงกับค่า pKa ได้แก่พีเอช 6

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาดังกล่าวจึงเลือกพีเอช 6 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลในการทำการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกับค่า pKa ของการแตกตัวของโคโคแซนมากที่สุด รวมถึงที่พีเอช 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไม่แตกต่างกับผลการศึกษาที่พีเอช 8 และ 10 ทั้งนี้การปรับพีเอชของสารละลายให้เหมาะสมจะช่วยเพิ่มปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแซนของโลหะบนโคโคแซนได้ ดังที่ Inoue และคณะ, 1993 พบว่าอัตราส่วนการกระจายของการดูดซับบนโคโคแซน (การดูดซับที่สมดุลต่อความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล) มีค่าสูงขึ้นไปพีเอช 4-5 นอกจากนี้ค่าพีเอชของแหล่งน้ำธรรมชาติ มีค่าอยู่ในช่วง 6-8.5 ซึ่งสอดคล้องกับ

คำอธิบายของ Rorrer และคณะ, 1993 ที่กล่าวไว้ว่า การนำโคโตแซนมาดูดซับไอออนประจุบวก เช่น ทองแดง (Cu^{2+}) แคดเมียม (Cd^{3+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) โครเมียม ($\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6+}$) สังกะสี (Zn^{2+}) และอื่นๆ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนประจุบวกจะอยู่ในช่วงพีเอช 6-7



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย และพีเอชที่เหมาะสมที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

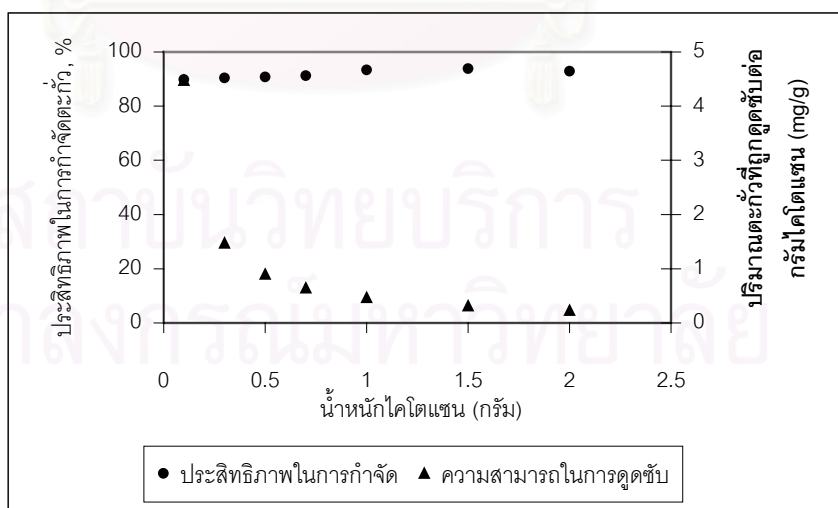


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย และพีเอชที่เหมาะสม ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4 ผลการศึกษาปริมาณโคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ

ผลการศึกษาปริมาณโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำมาปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.4.2 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมโคโตแซนในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 1.5 และ 2 กรัม ลงไปในหลอดทดลองตามลำดับ นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.13

ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่ปริมาณโคโตแซน 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 1.5 และ 2 กรัม มีค่าไม่ต่างกันตามปริมาณโคโตแซนที่ใช้ดูดซับซึ่งเท่ากับ 89.83% 90.37% 90.83% 91.30% 93.43% 93.9% และ 92.87 % ตามลำดับ แต่ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนลดลงเมื่อใช้ปริมาณโคโตแซนมากขึ้น ซึ่งได้แก่ 4.47 1.47 0.90 0.64 0.47 0.31 และ 0.23 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลจากการมีเม็ดโคโตแซนจำนวนมากขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วที่มีอยู่ในสารละลาย เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 0.1-0.5 มิลลิกรัม และค่าปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0.1-0.5 มิลลิกรัม ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณโคโตแซนเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่ากลางมาเป็นตัวแทนของปริมาณโคโตแซนที่เหมาะสมในการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนกับปริมาณโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เหมาะสม

4.5 ผลการศึกษาผลของสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

การศึกษาผลของสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ซึ่งได้แก่ อีดีทีเอ เอ็นทีเอ และกรดทาทาริก โดยใช้ไคโตแซน 0.3 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่อความเข้มข้นของสารคีเลตเท่ากับ 1:0.5 1:1 1:2 โมลต่อโมล โดยใช้ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง มีรายละเอียดดังนี้

4.5.1 ผลของอีดีทีเอ

จากผลการศึกษาผลของอีดีทีเอ ที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอีดีทีเอ 36 72 และ 144 มิลลิกรัมต่อลิตร (เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนโดยโมลกับตะกั่วจะได้ปริมาณตะกั่วต่อปริมาณอีดีทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ) พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 พบว่า เมื่อมีสารละลายอีดีทีเอเข้ามาเกี่ยวข้องกับในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายมีการเปลี่ยนแปลง โดยจากหัวข้อที่ 4.2 เมื่อพีเอชสูงตะกั่วจะถูกดูดซับได้ดี แต่ในการทดลองนี้เมื่อเติมอีดีทีเอลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่พีเอชสูงมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอีดีทีเอประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งมีสาเหตุมาจากอีดีทีเอในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับตะกั่วได้สมการที่ 4.2-4.3 ดังนี้ (Stumm and Morgan, 1995 อ้างถึงในปริดา, 2544)



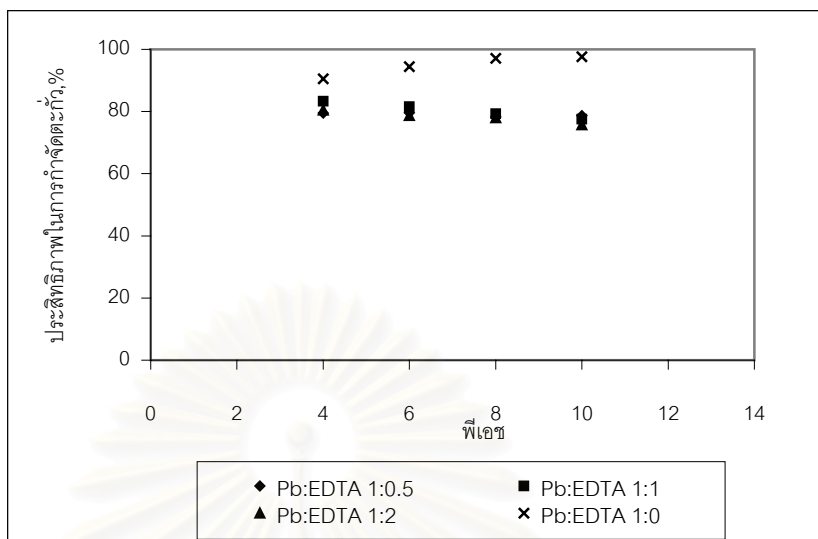
ทั้งนี้สามารถอธิบายถึงปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนที่มีค่าลดลงได้ว่า เป็นผลจากการเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ ระหว่างหมู่อะมิโนบนไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายกับ $\text{PbH}(\text{EDTA})^{-}$ ในทำนองเดียวกันกับ $\text{Pb}(\text{EDTA})^{2-}$ นอกจากนี้อาจเกิดการเปลี่ยนรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ กับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับอีดีทีเอที่ไม่เกิดการดูดซับในสารละลาย (Juang and Chen, 1996a อ้างถึงใน Juang and Ju, 1997) ซึ่งปริมาณ

ตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคเตแซนที่ลดลงในช่วงพีเอช 5-6 อาจเนื่องมาจากการแข่งขันในการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH⁻) และหมู่อะมิโนกับโลหะที่เกิดการคีเลต นอกจากนี้การดูดซับที่สมดุลของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วกับอีดีทีเอ ยังมีผลเนื่องมาจากการมีเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salt) เช่น Na₂SO₄ อยู่ในสารละลายที่พีเอชน้อยกว่า 6 ด้วย (Juang and Chen, 1996b อ้างถึงใน Juang and Ju, 1997)

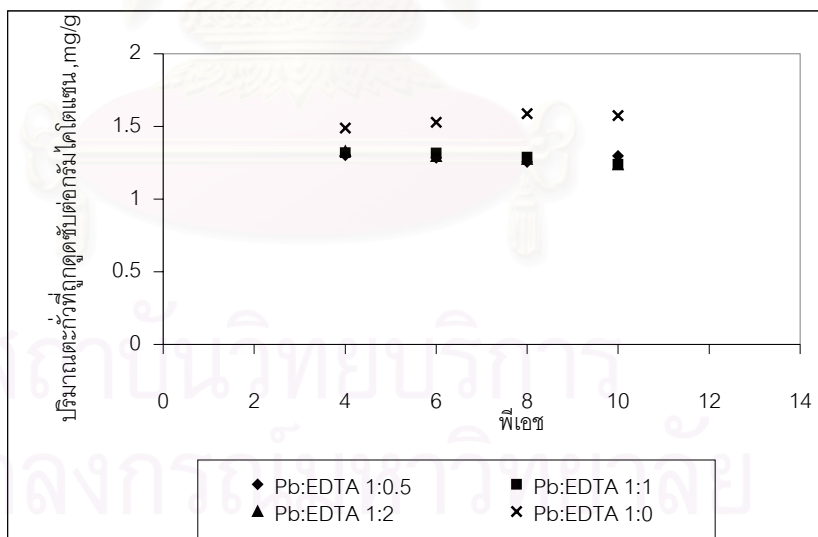
สำหรับ Pb(EDTA)²⁻ สามารถเกิดพันธะกับโคโคเตแซนได้ที่หมู่อะมิโนที่ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนแล้ว เช่นเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักที่มีประจุลบชนิดอื่น ๆ ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 4.4



เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.4 พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วจะสร้างพันธะกับโคโคเตแซนได้ดีที่พีเอชต่ำหรือในสภาวะที่โคโคเตแซนอยู่ในรูป R-NH₃⁺ นั่นเอง ซึ่งที่พีเอชต่ำ โคโคเตแซนจะอยู่ในรูปประจุบวกซึ่งเหมาะแก่การดูดซับสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิลลบเช่น Pb(EDTA)²⁻ และเมื่อเติมอีดีทีเอลงในน้ำเสียสังเคราะห์ในปริมาณมากขึ้น จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วมากขึ้น และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่พีเอชต่ำกว่า 6 จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



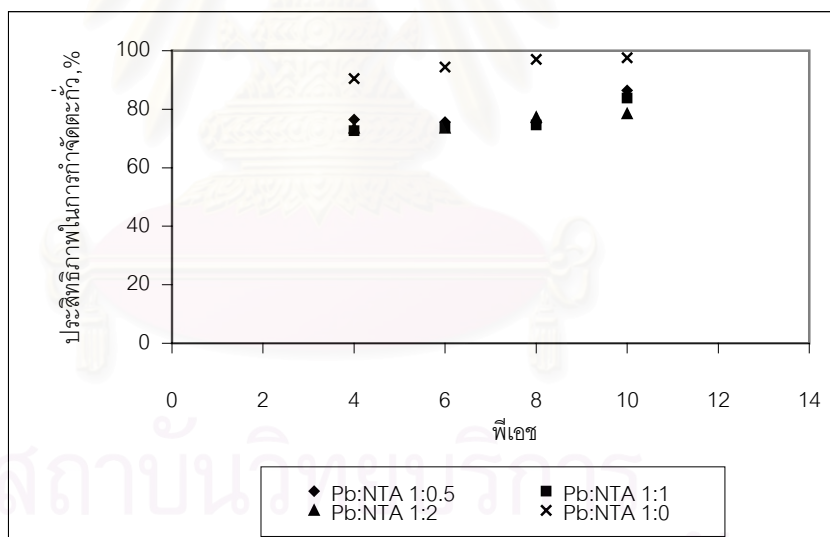
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่ออีดีทีเอในปริมาณต่างๆ



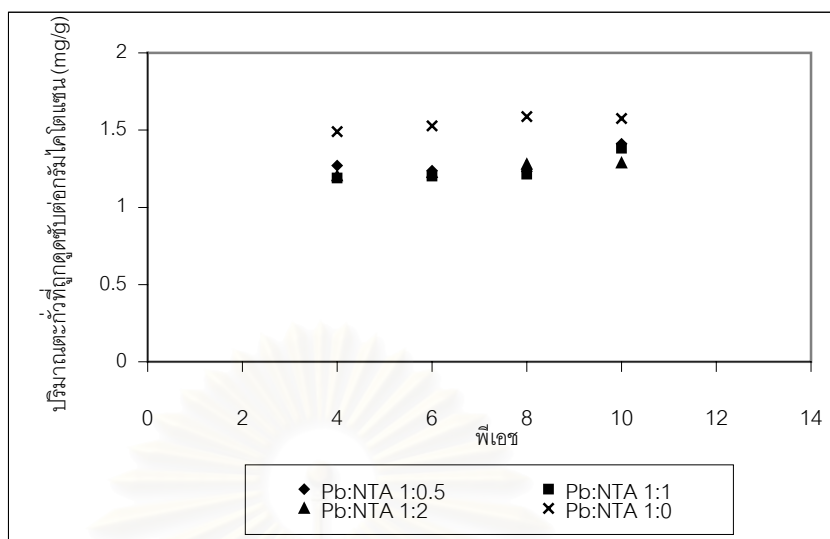
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแตนกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่ออีดีทีเอในปริมาณต่างๆ

4.5.2 ผลของเอ็นทีเอ

สำหรับการศึกษาผลของเอ็นทีเอที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเอ็นทีเอ 18.5 37 และ 74 มิลลิกรัมต่อลิตร (เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนโดยโมลกับตะกั่วจะได้ปริมาณตะกั่วต่อปริมาณเอ็นทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ) พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 พบว่าปริมาณเอ็นทีเอที่เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช เมื่อเทียบกับผลของการทดลองจากหัวข้อที่ 4.2 โดยในการทดลองนี้เมื่อเติมเอ็นทีเอลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่พีเอช 4-6 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนที่พีเอชสูง ตั้งแต่ 8-10 สามารถดูดซับตะกั่วได้ดี เช่นเดียวกับผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.2 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเอ็นทีเอ พบว่าประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอช ที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอในปริมาณต่างๆ

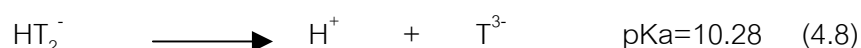


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคไตเซนกับค่าพีเอช ที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอในปริมาณต่างๆ

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคไตเซนนั้น มีค่าลดลงเมื่อมีสารละลายเอ็นทีเอเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งนี้เนื่องมาจากเอ็นทีเอในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับตะกั่วได้ โดยเอ็นทีเอ (H_3T) จะสูญเสียไฮโดรเจนไอออน 3 ครั้ง จึงจะอยู่ในรูปแอนไอออนของตัวเอง (T^{3-}) ดังสมการที่ 4.5-4.7



ดังนั้นการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอ็นทีเอกับตะกั่วจึงขึ้นอยู่กับค่าพีเอช นั่นคืออยู่ในรูป H_3T , H_2T^- , HT_2^- และ T^{3-} ในช่วงพีเอช < 1, 2-3, 4-9 และ > 12 ตามลำดับ (Stanley, 1994) ซึ่งจากการทดลองได้ออกแบบให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4-10 ดังนั้น ไอออนที่ปรากฏในสารละลายเป็นส่วนใหญ่คือ HT_2^- และ T^{3-} ดังสมการที่ 4.8-4.9





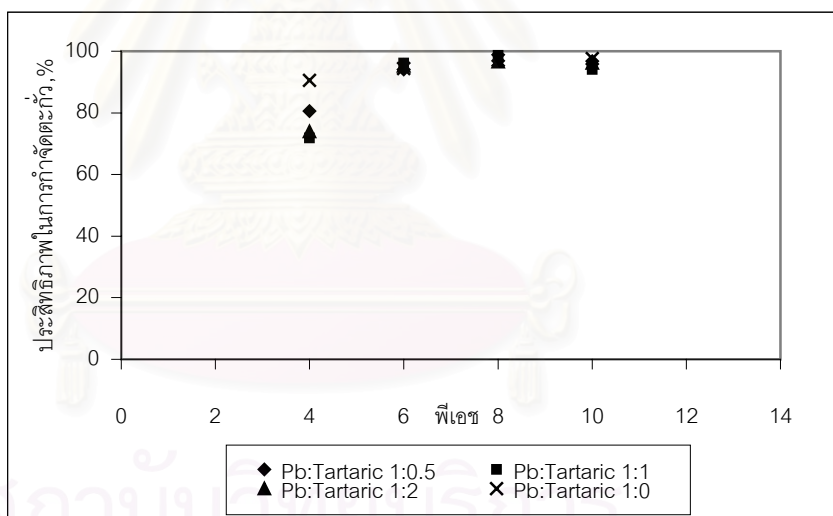
$\text{Pb}(\text{T})^{-}$ เป็นสารประกอบในรูปประจุลบจะสามารถสร้างพันธะกับโคโตแซนได้ดีที่พีเอชต่ำ ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า นั่นคือเมื่อประจุของหมู่อะมิโนบนโคโตแซนอยู่ในรูปประจุบวกเช่นเดียวกับการเกิดพันธะของโคโตแซนกับ $\text{Pb}(\text{EDTA})^{2-}$ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังสมการที่ 4.10



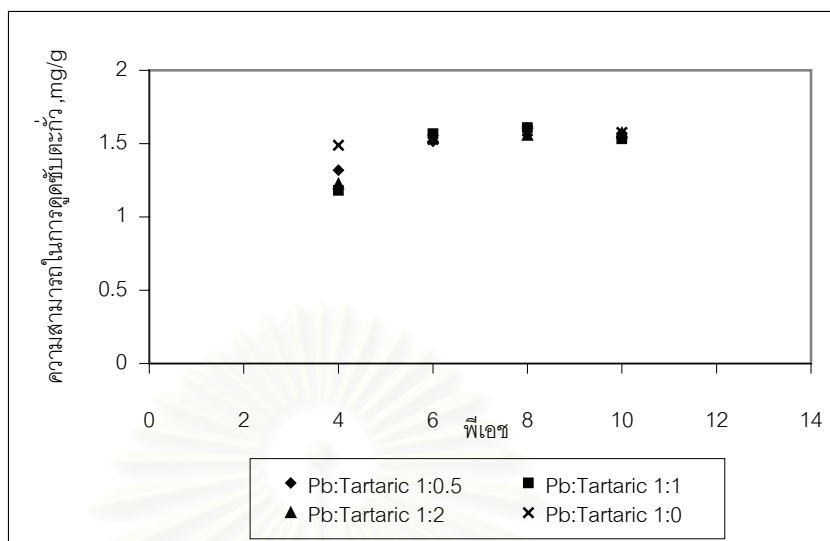
จากสมการที่ 4.10 มีผลทำให้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วและเอ็นทีเอถูกดูดซับไว้บนโคโตแซนได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ เนื่องจากที่พีเอชดังกล่าวโคโตแซนจะอยู่ในรูปประจุบวกที่สามารถเกิดพันธะกับไอออนประจุลบได้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าซึ่งมีไอออนประจุลบของ $\text{Pb}(\text{T})^{-}$ เป็นส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดตะกั่วที่พีเอชต่ำจึงควรมีค่าสูงและที่พีเอชสูงควรมีค่าน้อยลง โดยสอดคล้องกับผลการดูดซับที่พีเอช 4-8 แต่ที่พีเอชมากกว่า 8 ประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนด้วยโคโตแซนกรณีอัตราส่วนโมลต่อโมลของสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอเท่ากับ 1:1 และ 1:2 มีค่าสูงชันกว่าเดิมมาก ซึ่งอาจเกิดจากการมีตะกั่วในสารละลายที่มากเกินไปในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับเอ็นทีเอ จึงทำให้เหลือไอออนของตะกั่วที่ไม่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในสารละลายและทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างไอออนดังกล่าวกับโคโตแซนที่เป็นประจุลบได้ โดยกลไกการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับเอ็นทีเอเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เช่นเดียวกันกับกลไกการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับอีดีทีเอ

4.5.3 ผลของกรดทาทาริก

สำหรับผลการศึกษาผลของกรดทาทาริกที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดทาทาริก และ 14.5 29 และ 58 มิลลิกรัมต่อลิตร (เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนโดยโมลกับตะกั่วจะได้ปริมาณตะกั่วต่อปริมาณกรดทาทาริกเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ) พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 พบว่าเมื่อมีสารละลายกรดทาทาริกมาเกี่ยวข้องในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 กล่าวคือเมื่อพีเอชสูงตะกั่วจะถูกดูดซับได้ดีเช่นเดียวกัน แต่ที่พีเอชน้อยกว่า 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซน มีค่าลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่ว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดทาทาริกพบว่าประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง โดยผลที่ได้ใกล้เคียงกับผลจากหัวข้อที่ 4.2 เว้นที่พีเอช 4 จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอช ที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อกรดทาทาริกในปริมาณต่างๆ

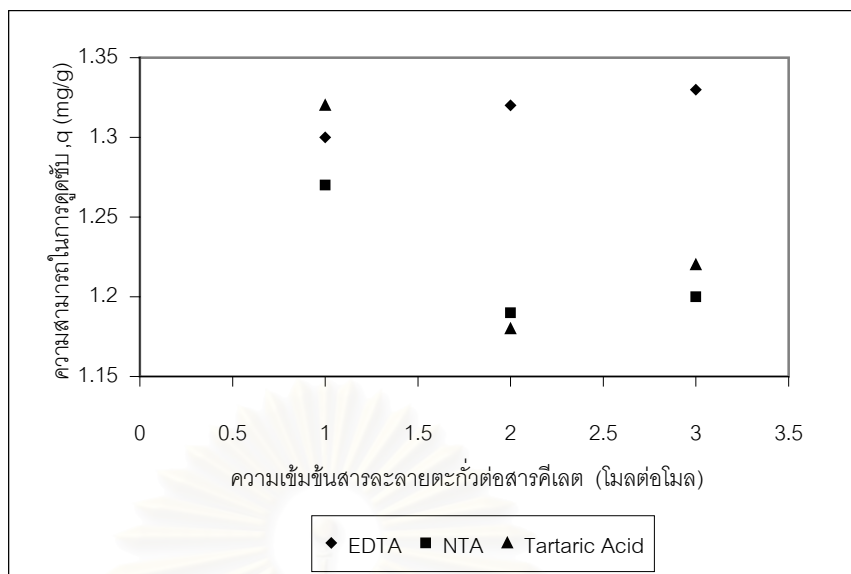


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแทนกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนโมลต่อโมลสารละลายตะกั่วต่อกรดทาทาริกในปริมาณต่างๆ

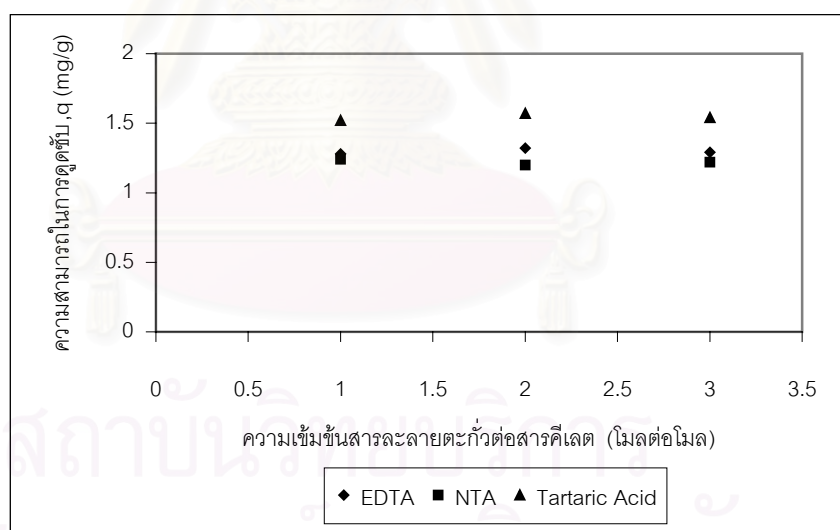
เมื่อพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมสารคีเลต พบว่าประสิทธิภาพและปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแทนเพิ่มขึ้นเมื่อมีกรดทาทาริกเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งนี้เนื่องจากกรดทาทาริกในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับตะกั่วได้ดังสมการที่ 4.11



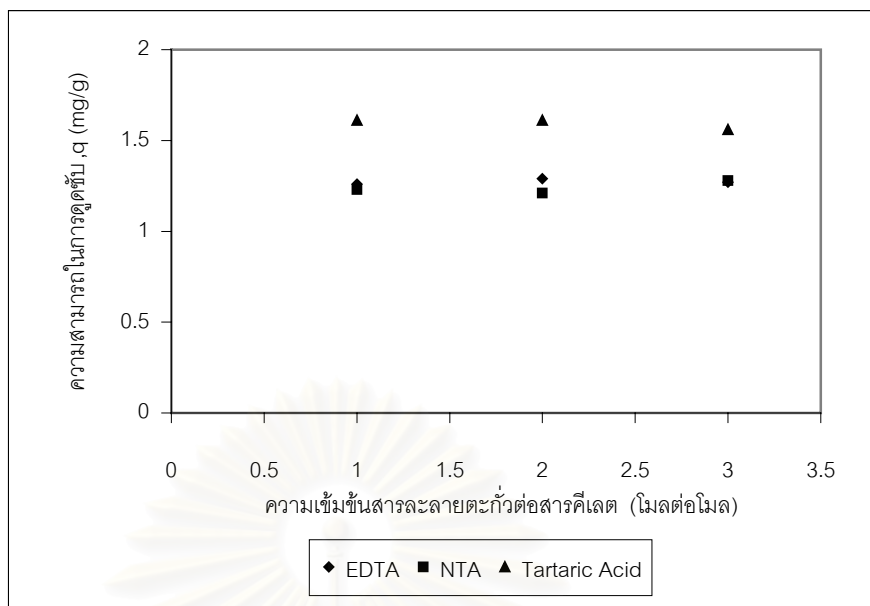
จากสมการที่ 4.11 สารประกอบเชิงซ้อนของกรดทาทาริกและตะกั่วที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบที่ไม่มีประจุ ดังนั้นจึงไม่เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับโคโคแทนทั้งสภาวะกรดที่ซึ่งโคโคแทนจะอยู่ในรูปประจุบวกและด่างซึ่งโคโคแทนจะอยู่ในรูปประจุลบได้ ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าการเติมกรดทาทาริกลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีผลต่อการดูดซับตะกั่วเลย ทำให้ผลการทดลองในการดูดซับตะกั่วที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารคีเลตชนิดนี้ ไม่แตกต่างไปจากการทดลองดูดซับตะกั่วด้วยโคโคแทนคือเป็นการเกิดพันธะคีเลตและเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแทนสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดดังรูปที่ 4.20 4.21 4.22 และ 4.23 ได้ผลดังตารางที่ 4.1



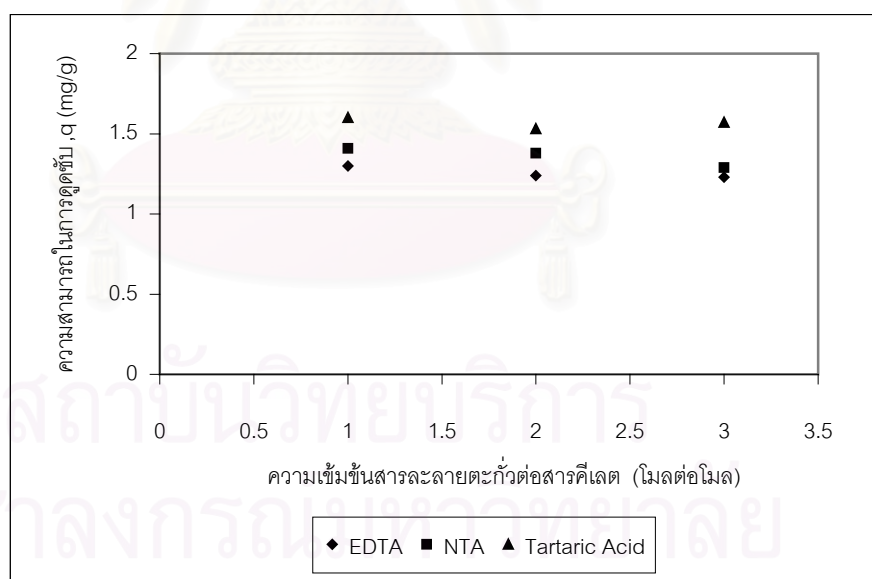
รูปที่ 4.20 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคไธเซน ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 4



รูปที่ 4.21 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคไธเซนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 6



รูปที่ 4.22 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแทนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 8



รูปที่ 4.23 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโคแทนที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอช 10

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนสารประกอบ
เชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิด

พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่อสารคีเลต (โมลต่อโมล)	ผลการศึกษา
4	1:0.5	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:1	อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ > กรดทาทาริก
	1:2	อีดีทีเอ > กรดทาทาริก > เอ็นทีเอ
6	1:0.5	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:1	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:2	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
8	1:0.5	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:1	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:2	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
10	1:0.5	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:1	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ
	1:2	กรดทาทาริก > อีดีทีเอ > เอ็นทีเอ

จากตารางที่ 4.1 พบว่า พีเอชมากกว่า 4 ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับกรดทาทาริกจะมีค่าสูงกว่าอีดีทีเอและเอ็นทีเอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu และคณะ, 1999 ซึ่งได้ทำการศึกษาการดูดซับสารประกอบทองแดงกับสารคีเลต 4 ชนิด ได้แก่ กรดทาทาริก ซีเตรต กลูโคเนต และอีดีทีเอ บนโคโตแซนแบบผง โดยปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ กรดทาทาริก ซีเตรต กลูโคเนต และอีดีทีเอ ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 ผลการทดลองการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายโดยการทดลองแบบคอลัมน์

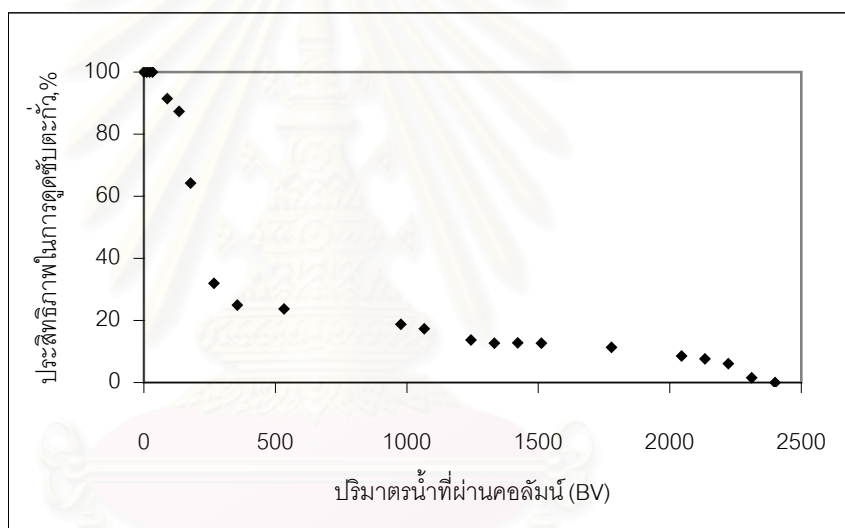
ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ภายในบรรจุไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายปริมาณ 5.4 กรัม (ความสูงของไคโตแซนเท่ากับ 12 เซนติเมตรหรือ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชเริ่มต้น 6 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.5.4.2 และให้อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์เท่ากับ 200 มิลลิตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 44 เท่าของปริมาตรเบด (Bed Volume) ต่อชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์จนกระทั่งน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นก่อนผ่านคอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของน้ำขาออกต่อน้ำขาเข้าเท่ากับ 1) กำหนดให้ค่าความเข้มข้นในการเบรคทรูจ (Breakthrough Concentration) เท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นตามมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยชุดอุปกรณ์ที่ทำการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ชุดอุปกรณ์ทดลองแบบคอลัมน์

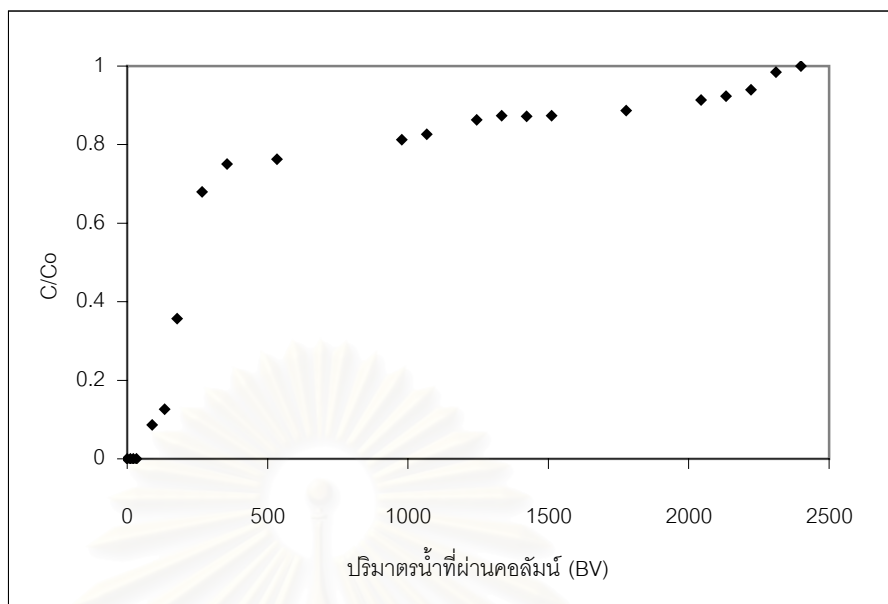
จากผลการทดลองพบว่าปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนความเข้มข้นของน้ำเสียขาออกเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียขาเข้า (C/Co=1) มีปริมาตรเท่ากับ 2400 BV ซึ่งเท่ากับป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ให้ไหลผ่านคอลัมน์ไปได้ 10.80 ลิตรโดยใช้เวลาไป 54 ชั่วโมง และสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งคือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ภายในปริมาตร 88.89 BV ซึ่งเท่ากับป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ให้ไหลผ่านคอลัมน์ไปได้เท่ากับ 0.4 ลิตรโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งมีค่าเท่ากับ 91.40%

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการกำจัดตะกั่วระหว่างวิธีแบบแบตซ์ และวิธีแบบคอลัมน์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการทดลองแบบคอลัมน์เท่ากับ 54 ชั่วโมงโดยใช้เวลา มากกว่าแบบแบตซ์ที่ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลเท่ากับ 4 ชั่วโมงถึง 13.5 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองแบบคอลัมน์ โคลิตแซนที่ใช้เป็นสารดูดซับไม่ได้ถูกกวนเช่นเดียวกันกับการทดลองแบบแบตซ์แต่ถูกบรรจุไว้ในคอลัมน์ซึ่งทำให้พื้นที่ในการดูดซับของโคลิตแซนถูกจำกัดจึงไม่สามารถดูดซับสารละลายตะกั่วได้อย่างเต็มที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจึงลดลงซึ่งจากการคำนวณพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของการทดลองแบบคอลัมน์เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 17.33% ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของการทดลองแบบแบตซ์มีค่าเท่ากับ 49.17% โดยการทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดตะกั่วได้ประมาณ 35% ของการทดลองแบบแบตซ์ ซึ่งผลการทดลองดูดซับตะกั่วด้วยวิธีแบบคอลัมน์แสดงดังรูปที่ 4.25-4.27

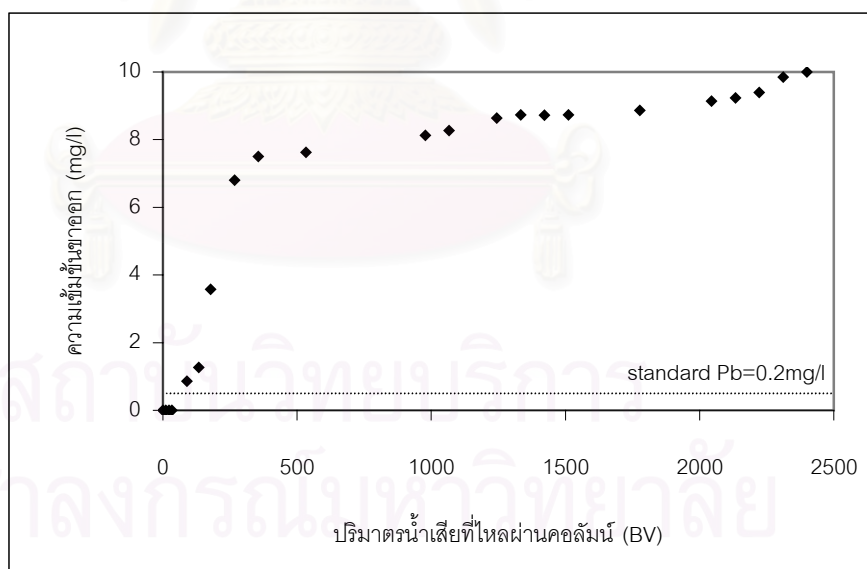


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว ที่ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



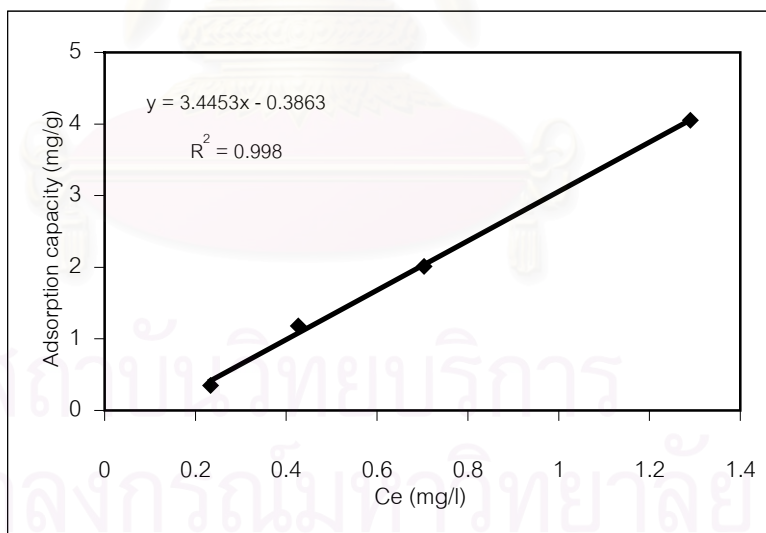
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ กับสัดส่วนความเข้มข้นน้ำเสียขาออกต่อน้ำเสียขาเข้าที่ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำเสียขาออก กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6

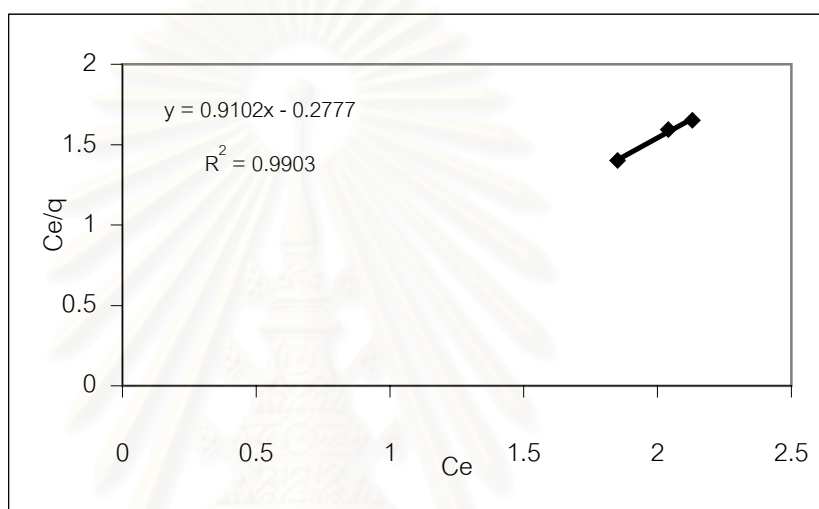
4.7 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ในการกำจัดตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

จากการทดลองพบว่า ไอโซเทอมการดูดซับที่ภาวะการทดลองเมื่อพีเอชเท่ากับ 6 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นพีเอชและเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับในแต่ละความเข้มข้นต่างๆ เป็นไอโซเทอมแบบเส้นตรง (Linear Isotherm) ซึ่งมีค่า R Square เท่ากับ 0.998 ดังรูปที่ 4.28 เนื่องจากในช่วงที่ทำการศึกษามีไคโตแซนปริมาณมากเพียงพอที่จะดูดซับสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณไคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่ทำการศึกษามีความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วจะทำให้ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนต่อน้ำหนักไคโตแซนเพิ่มขึ้นตามไปในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกันแบบเส้นตรง จึงทำให้ไม่สามารถหาปริมาณตะกั่วสูงสุดที่ถูกดูดซับต่อกรัมไคโตแซนได้ เนื่องจากยังไม่เกิดสภาวะสมดุลของการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา แม้ว่าค่า R Square ของการดูดซับเมื่อคิดเป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟลูนดลิช (0.9555 และ 0.9773 ตามลำดับ) จะมีค่าใกล้เคียงกับไอโซเทอมแบบเส้นตรงก็ตาม

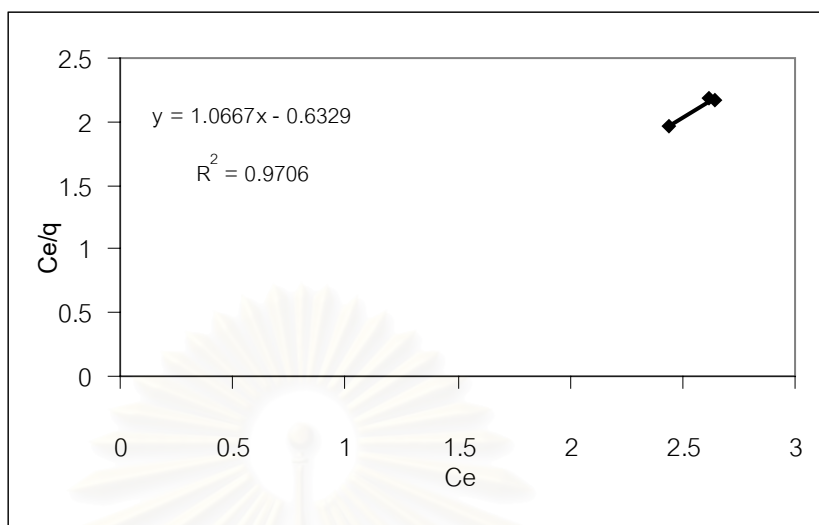


รูปที่ 4.28 ไอโซเทอมแบบเส้นตรงของการดูดซับสารละลายตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอช 6 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง

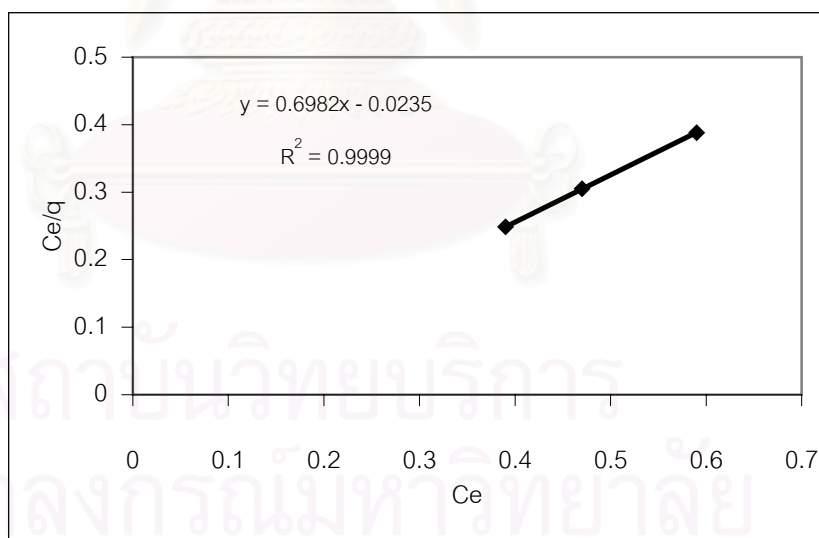
สำหรับไอโซเทอมของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลต ซึ่งได้แก่ อีดีทีเอ เอ็นทีเอ และกรดทาทาริก เมื่อนำข้อมูลการทดลองมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟลูนดลิช แล้วพิจารณาค่า R-Square ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ พบว่า ค่า R-Square ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์มีค่าสูงกว่าแบบฟลูนดลิช คือมีค่าเป็น 0.9903 0.9706 และ 0.9999 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า R-Square ของไอโซเทอมแบบฟลูนดลิช มีค่าเท่ากับ 0.7275 0.6662 และ 0.9722 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.29-4.31



รูปที่ 4.29 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอช 6 เวลาสัมพัทธ์ 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.30 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอินทรีย์ด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอช 6 เวลาสัมผัสด 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.31 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วกรดทาทริกด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอช 6 เวลาสัมผัสด 4 ชั่วโมง

4.8 การศึกษาผลการละลายของโคโตแซนหลังเกิดการดูดซับ

ผลการทดลองการละลายของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย หลังจากนำไปทดลองดูดซับที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แล้วนำไปวัดค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer (TOC) ได้ผลดังนี้

กรณีศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับพบว่า โคโตแซนละลายน้ำได้แบบโครงร่างตาข่ายละลายน้ำได้น้อยคือประมาณ 3-4% ที่พีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 6 และสำหรับกรณีการศึกษาผลของพีเอชพบว่า ที่เปอร์เซ็นต์การละลายของโคโตแซนมีค่าไม่แตกต่างกันในแต่ละพีเอชและความเข้มข้นคือ 4-5% ส่วนกรณีศึกษาปริมาณโคโตแซนที่เหมาะสมในการดูดซับที่พีเอช 6 พบว่าเปอร์เซ็นต์การละลายของโคโตแซนมีค่าลดลงตามปริมาณโคโตแซนที่ใช้คือ 5.39% 3.12% 2.55% 2.26% 2.23% 1.98% และ 1.92% ที่ปริมาณโคโตแซน 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ตามลำดับ ซึ่งยังคงแสดงให้เห็นว่าโคโตแซนละลายน้ำได้น้อยที่พีเอช 6 โดยรายละเอียดของผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ ข1-ข3 ภาคผนวก ข

4.9 เปรียบเทียบผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ ได้นำงานวิจัยของ ปรีดา นันทพุลทรัพย์ เมื่อปีพ.ศ. 2544 ที่ได้ทำการศึกษาค่าผลของความแรงไอออนและสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยโคโตแซนแบบผง พบว่าผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับตะกั่วเป็นไปในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยที่ทำการศึกษานี้ นั่นคือปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนด้วยโคโตแซนจะเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้นในช่วงที่ทำการศึกษา และการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วจะทำให้ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนเพิ่มมากขึ้นด้วย การเติมอิตีที่เอซึ่งใช้เป็นสารคีเลตลงไป ในสารละลายตะกั่วทำให้พีเอชในการดูดซับตะกั่วเปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมโคโตแซนที่พีเอชสูงมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอิตีที่เอกับตะกั่วซึ่งมีประจุเป็นลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับสารประกอบเชิงซ้อนนั้นที่พีเอชต่ำซึ่งโคโตแซนจะอยู่ในรูปประจุบวก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบผง มีค่าน้อยกว่าการใช้โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยที่พีเอช 6 เมื่อใช้ความเร็วรอบในการเขย่า 300 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเมื่อใช้โคโตแซนแบบผงมีค่าประมาณ 40% ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเมื่อใช้โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่พีเอช 6 ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาทีมีค่าอยู่ในช่วง 76-90%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย โดยทำการทดลองทั้งแบบแบดจ์และคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายพบว่าการทำโครงร่างตาข่ายส่งผลให้รูพรุนของไคโตแซนมีมากขึ้นและเกิดการพองตัวที่ดีกว่า ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการนำไปใช้งาน โดยรูพรุนของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่นำไปทดลองดูดซับสารละลายตะกั่วจะมีมากกว่ากรณีที่ยังไม่ได้นำไปดูดซับ เนื่องจากไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายเกิดการพองตัวขึ้นหลังจากนำไปดูดซับจึงทำให้ช่องว่างภายในหรือรูพรุนขยายตัวขึ้น พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5.1.2 สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย พบว่าในช่วงที่ทำการศึกษา ปริมาณไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายมีจำนวนมากพอที่จะสามารถดูดซับตะกั่วในช่วงที่ทำการศึกษาได้ จึงเลือกใช้ไคโตแซนปริมาณ 0.3 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที พีเอช 6 ภายในเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองครั้งนี้ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่พีเอชสูงจะดีกว่าที่พีเอชต่ำ เนื่องจากหมู่อะมิโนของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนได้ดีที่พีเอชต่ำ ซึ่งไคโตแซนจะมีประจุเป็นบวก จึงเป็นอุปสรรคต่อการดูดซับไอออนประจุบวกเช่นเดียวกัน

5.1.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นของสารละลายตะกั่ว ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วต่อน้ำหนักไคโตแซนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้นและปริมาณไคโตแซนเท่ากัน เนื่องจากในช่วงที่ทำการศึกษามีไคโตแซนจำนวนมากพอ

5.1.4 อีดีทีเอและเอ็นทีเอทำให้พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนเปลี่ยนแปลงไปคือ เมื่อเพิ่มปริมาณอีดีทีเอและเอ็นทีเอลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่พีเอชน้อยกว่า 6 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับที่พีเอชสูงกว่า 6 ลดลง เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์กับอีดีทีเอและเอ็นทีเอในรูป $Pb(EDTA)^{2-}$ และ $Pb(T)^-$ ตามลำดับซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไคโตแซนที่พีเอชต่ำได้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ดังนั้นที่พีเอชต่ำจึงมีความเหมาะสมต่อการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับอีดีทีเอและตะกั่วกับเอ็นทีเอ

5.1.5 สำหรับการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างตะกั่วกับกรดทาทาริก พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วไม่มีการเปลี่ยนแปลงนั่นคือ ที่พีเอชสูงไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายยังคงมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวได้ดีกว่าที่พีเอชต่ำ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกรดทาทาริกลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของ $Pb(Tartrate)$ ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วนี้ไม่ได้เกิดจากกลไกการดูดซับทางกายภาพ หรือการเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic Attraction) แต่เกิดจากพันธะคีเลตระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วและไคโตแซน ในลักษณะเช่นเดียวกันกับพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างตะกั่วกับไคโตแซน

5.1.6 การทดลองแบบคอลัมน์สามารถบำบัดน้ำเสีย ให้มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งคือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ภายในปริมาตร 88.89 BV โดยเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการทดลองแบบคอลัมน์มากกว่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการทดลองแบบแบตช์ 13.5 เท่า เนื่องจากในการทดลองแบบคอลัมน์ ไคโตแซนที่ใช้เป็นสารดูดซับไม่ได้ถูกวนเช่นเดียวกันกับการทดลองแบบแบตช์แต่ถูกบรรจุไว้ในคอลัมน์ ซึ่งทำให้พื้นที่ในการดูดซับของไคโตแซนถูกจำกัดจึงไม่สามารถดูดซับสารละลายตะกั่วได้อย่างเต็มที่

5.1.7 การกำจัดตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง เนื่องจากมีปริมาณไคโตแซนมากเพียงพอที่จะดูดซับสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นในช่วงที่ทำการศึกษา ส่วนการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารคีเลตแต่ละชนิดที่พีเอชและอัตราส่วนโมลต่อโมลของสารละลายตะกั่วกับสารคีเลตแตกต่างกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของกรดทาทาริกได้มากกว่าอีดีทีเอและเอ็นทีเอตามลำดับ

5.1.8 การศึกษาการละลายของไคโตแซนหลังเกิดการดูดซับพบว่าไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายละลายในน้ำได้น้อยมาก จึงมีความเหมาะสมในการนำมากำจัดตะกั่วในน้ำเสียที่มีพีเอชต่ำได้ดีกว่าไคโตแซนแบบผงหรือไคโตแซนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย

5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์

จากผลการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

5.2.1 สามารถนำไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายไปใช้ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในปริมาณน้อย และน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่ว

5.2.2 สามารถทำนายความเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักที่มีประจุ +2 เช่นเดียวกับกับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายว่าเหมาะสมหรือไม่โดยพิจารณาจาก

5.2.2.1 พีเอชของน้ำเสีย โดยที่พีเอชต่ำความสามารถในการดูดซับโลหะของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายจะน้อยกว่าที่พีเอชสูง แต่อย่างไรก็ตามไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายยังมีความเหมาะสมในการใช้งานที่พีเอชต่ำเนื่องจากเกิดการละลายได้น้อยมาก

5.2.2.2 ผลของสารคีเลตแต่ละตัวที่มีต่อโลหะนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งการมีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับสารอินทรีย์อยู่ในน้ำเสียจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะเปลี่ยนแปลงไป โดยสำหรับงานวิจัยนี้ รูปแบบของโลหะหนักที่มีประจุ +2 และ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะประจุ +2 กับกรดทาทริกน่าจะทำได้ดีที่พีเอชสูงเช่นเดียวกับตะกั่ว ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะประจุ +2 กับอัสดีทีเอและเอ็นทีเอน่าจะทำได้ดีที่พีเอชต่ำ

5.2.3 สามารถนำไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายมาใช้กำจัดตะกั่วในแบบคอลัมน์ต่อเนื่องได้แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาการบำบัดซึ่งนานกว่าแบบกะ เนื่องจากพื้นที่ในการดูดซับของไคโตแซนถูกจำกัด

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่ว จากสารละลายด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.3.1 ศึกษาการใช้โคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย ในการกำจัดโลหะหนักและสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักชนิดอื่นๆ โดยตรวจสอบสมมติฐานที่ว่า การดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับอีดีทีเอและตะกั่วกับเอ็นทีเอเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วกับกรดทาทริกเป็นพันธะคีเลตโดยการทำให้ Desorption

5.3.2 ศึกษาและเปรียบเทียบผลการกำจัดโลหะ และสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะจากการเตรียมโครงร่างตาข่ายของโคโตแซนด้วยสารเคมีชนิดอื่น เช่น อีพิฮาโลไฮดริน (Epihalohydrin) เด็กซ์แทรนไดอัลดีไฮด์ (Dextran Dialdehyde)

5.3.3 ศึกษาการรีเจนเนอเรตในการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้เบสแก่

5.3.4 ศึกษาการนำน้ำเสียจริงมาทำการทดลองกำจัดโลหะหนักด้วยโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายทั้งแบบแบดจ์และแบบคอลัมน์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชาญวิทย์ ศุภรานนทร์รัตน์. 2543. ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิตยา รัตนานนท์ และ วิบูลย์ รัตนานนท์. 2543 สารพิษในอาหาร. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ปรัชญาพร สุวรรณเกษ. 2535. การปนเปื้อนของสารตะกั่วในดินริมถนนบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา นันทพูลทรัพย์. 2544. ผลของความแรงไอออนและสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตแซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต. 2538 แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา. เล่ม 2 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตเกล้า ภูติวรนาถ. 2539. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รามนรี เนตรวิเชียร. 2543. การกำจัดสารหนูในรูปอาร์ซีเนตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไคโตแซนแบบเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาธารณสุข, กระทรวง. กองอาชีวอนามัย กรมอนามัย 2522-2533. การศึกษาหาค่ามาตรฐานของระดับตะกั่ว แมงกานีส และแคดเมียมในเลือดและปัสสาวะของกลุ่มคนไทยปกติ.
- อัศวิน กิตติชัชวาล. 2539. โคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เอดจากไคโทแซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนามัยสิ่งแวดล้อม, กรม สำนักงานอนามัย กรุงเทพมหานคร 2543. ฝุ่นละออง (Suspended matter).

อุบลรัตน์ วาริชวัฒน์. 2544. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Auns, N. N. 1998. Adsorption/Desorption of Heavy Metals Using Chitosan. Journal of Environmental Reserch. V 20 No.1: 10-38.

Baily, S. E., Olin, T. J., Bricka, R. M. and Adrian, D. 1999. A Review of Potentially Low cost Sorbents for Heavy Metals. Water Research. 33 (II): 2469-2479.

Bloom, S. 2001. Synthesis of PEG-Chitosan: Chitosan as a Novel Biomaterial. Book of Abstract Chem 417, 497/498/499 project courses.

Chun, H. K., Jang, W. C., Heung, J. C. and Kyu, S. C. 1997. Synthesis of chitosan derivatives with quaternary ammonium salt and their antibacterial activity. Polymer Bulletin. V 38 (4): 387-393.

Eckenfelder, W. W., Jr. 1981. Appilcation of Adsorption to Wastewater Treatment.: Enviro press.

Eckenfelder, W. 1997. Developing Industrial Water Pollution Control Programs A primer. :Technomic Publishing Co. Inc.

Faust, S. D. and Aly, O. M. 1987. Adsorption Processes for Water Treatment. :Butterworths Publishers.

Faust, S. D. and Aly, O. M. 1998. Chemistry of Water treatment 2nd edition. :Ann Arbor Press, Inc.

Ford, D. L. 1992. Toxicity reduction evaluation and control : Water quality management library. V 3: Technomic Publishing Company, Inc.

Guibal, E., Saucedo, J., Jansson-Charrier, M., Delanghe, B. and Le, C. P. 1994. Uranium and Vanadium Sorption by Chitosan and Derivatives. Water Science & Technology. 30 (9): 183-190.

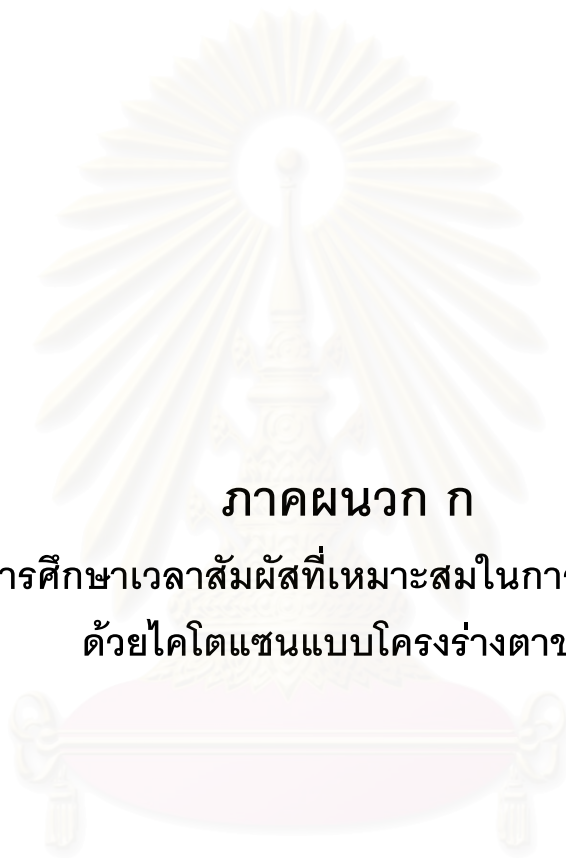
- Hsien, T. Y. and Rorrer, G. L. 1995. Effect of acetylation and crosslinking on the material properties and cadmium ion adsorption capacity of porous chitosan beads. Separation Science and Technology. V 30 No. 12: 2455-2475.
- Hsien, T. Y. and Rorrer, G. L. 1997. Heterogeneous Cross-Linking of Chitosan Gel Beads : Kinetics, Modeling and Influence on Cadmium Ion Adsorption Capacity. Industrial & Engineering Chemistry Research. V 36: 3631-3638.
- Huchinson, T. C. and Meema, K. M. 1987. Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment. New York : John Wiley & Sons.
- Inoule, K., Baby, Y., Yoshizuka, K. 1993. Adsorption of Metals on Chitosan and Cross linked Copper-Complexed Chitosan. Bulletin of the Chemical Society of Japan. V 66: 2915-2921.
- Jaafari, K., Elmaleh, S., Coma, J. and Benkhouja, K. 2001. Equilibrium and kinetics of nitrate removal by protonated cross-linked chitosan. Water SA. V 27 No.1:9-13.
- Juang, R. S. and Ju, C. Y. 1997. Equilibrium Sorption of Copper (II)-Ethylenediaminetetraacetic acid Chelates onto Cross-Linked Polyaminated Chitosan Beads. Industrial & Engineering Chemistry Research. V 36: 5403-5409.
- Kaminski, W. and Modrezejewska, Z. 1997. Application of chitosan Membrane in Separation of Heavy Metal Ions. Separation Science and Technology. 32 (16): 2659-2668.
- Kloner, T., Hempel, D. C. and Nortemann, B. 1998. Metabolism of EDTA and its Metal-Chelates by Whole Cells and Cell-free Extracts of Strain BNC1. Appl. Microbiol. Biotechnol. 49: 194-201.
- Kurita, K., Koyama, Y., and Taniguchi. 1986. A studies on chitin IX crosslinking of water-soluble chitin and evaluation of the products as adsorbents for cupric ion. Journal of Applied Polymer Science. V 31: 1169-1176.
- Lasko, C. L. and Hurst, M. P. 1999. An investigation into the use chitosan for the removal of soluble silver from industrial waste water. Environmental Science and technology. V 33 No.20: 3622-3626.
- Namasivayam, C. and Ranganathan, K. 1995. Removal of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and mixture of Metal Ions by Adsorption onto 'waste' Fe(III)/Cr(III) Hydroxide and Fixed Bed Studies. Environmental Technology. V 16: 851-860.

- Ngah, W. S. and Liang, K. H. 1999. Adsorption of Gold (III) Ions onto Chitosan and N-Carboxymethyl Chitosan : Equilibrium Studies. Industrial & Engineering Chemistry Research. V 38 No. 1: 1411-1414.
- Park, J. W., Park, M-O. and Park, K. K. 1984. Mechanism of Metal Ion Binding to Chitosan in Solution. Cooperative Inter-and Intramolecular Chelations. Bulletin of Korean Chemical Society. V 5 No.3: 108-112.
- Rorrer, G. L., Hsien, T. Y. and Way, J. D. 1993. Synthesis of porous-magnetic chitosan beads of cadmium ions from waste water. Industrial & Engineering Chemistry Research. V 32: 2170-2178.
- Schumuhl, R., Krieg, H. M. and Keizer, K. 2001. Adsorption of Cu(II) and Cr(III) ions by chitosan : Kinetics and equilibrium studies. Water SA. V 27 No. 1 : 1-7.
- Shahidi, F., Arachchi, J. K. V. and Jeon, Y-J. 1999. Food Applications of Chitin and Chitosans. Trends in Food Science & Technology. 10: 37-51.
- Stanley, E. M. 1994. Environmental Chemistry. :Lewis Publisher.
- Takatsuji, W. and Yoshida, H. 1998. Adsorption of Organic Acids on Polyaminated Highly Porous Chitosan : Equilibria. Industrial & Engineering Chemistry Research. V 37: 1300-1309.
- Vohra, M. S. and Davis, A. P. 1998. Adsorption of Pb(II), EDTA, and Pb(II)-EDTA onto TiO₂. Journal of Colloid and Interface Science. V 198: 18-26.
- World Health Organization. 1981. Environmental Health Criteria 3 : Lead. Geneva.
- Wu, F. C., Tseng, R. L. and Juang, R. S. 1999. Role of pH in Metal Adsorption from Aqueous Solutions Containing Chelating Agents on Chitosan. Industrial & Engineering Chemistry Research. V 38 No. 1: 270-275.
- Yang, S. C., Ge, H. X., Hu, Y., Jiang, X. Q. and Yang, C. Z. 2000. Formation of positively charged poly(butyl cyanoacrylate) nanoparticles stabilized with chitosan. Colloid Polymer Science. 278:285-292.
- Yunhua, G., Kyue-Hyung, L., Mitsuko, O. and Shoji, M. 2000. Adsorption Behavior of Metal Ions on Cross-linked Chitosan and the Determination of Oxoanions after Pretreatment with a Chitosan column. Analytical Sciences. V 16: 1303-1308.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

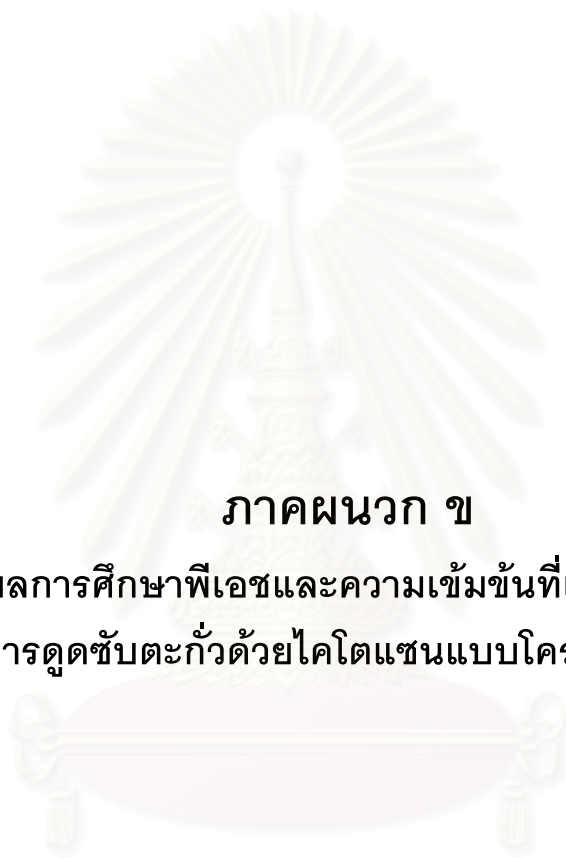
ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูซับตะกั่ว
ด้วยไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 6 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที

Time (hour)	Wt.chitosan (g)	Conc.	Conc.f	%Removal	Adsorption Capacity
0:00	0.0000	10.00	10.00	0.00	0
0:01	0.1075	10.00	6.68	33.17	0.77
0:05	0.1067	10.00	6.25	37.50	0.88
0:10	0.1046	10.00	3.76	62.43	1.49
0:15	0.1074	10.00	3.25	67.47	1.57
0:30	0.1086	10.00	3.38	66.23	1.52
1:00	0.1051	10.00	2.93	70.73	1.68
2:00	0.1064	10.00	3.86	61.37	1.44
6:00	0.1050	10.00	3.70	63.00	1.50
12:00	0.1081	10.00	3.85	61.53	1.42
24:00	0.1062	10.00	5.08	49.17	1.16
48:00	0.1067	10.00	5.34	44.63	1.04

Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)



ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาพิเศษและความเข้มข้นที่เหมาะสม
ในการดูระดับตะกั่วด้วยโคโตเซนแบบโครงร่างตาข่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 4 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Conc.i	pHi	pHf	Wt.chitosan	Conc.f	%Removal	Adsorption Capacity
Blank	4.00	4.92	0.1069	0.08	0	0
1.00	4.07	5.04	0.1089	0.44	56.33	0.26
3.00	4.04	4.64	0.1129	1.50	50.11	0.66
5.00	4.02	4.97	0.1121	2.06	58.87	1.31
10.00	4.00	5.23	0.1035	4.98	50.23	0.75

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 6 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Conc.i	pHi	pHf	Wt.chitosan	Conc.f	%Removal	Adsorption Capacity
Blank	6.02	6.86	0.1021	0.09	0	0
1.00	6.11	6.86	0.1093	0.23	76.67	0.35
3.00	6.06	6.92	0.1088	0.43	85.78	1.18
5.00	6.15	6.54	0.1068	0.70	85.93	2.01
10.00	6.16	7.34	0.1075	1.29	90.60	4.05

pHi	พีเอชของสารละลายตะกั่วก่อนทำการทดลอง
pHf	พีเอชของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง
Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)

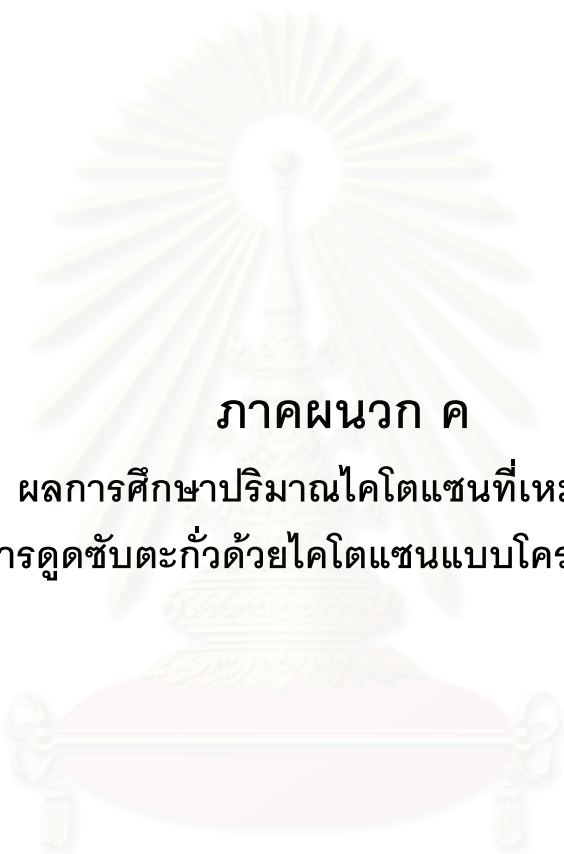
ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 8 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Conc.i	pHi	pHf	Wt.chitosan	Conc.f	%Removal	Adsorption Capacity
Blank	8.06	7.71	0.1139	0.07	0	0
1.00	8.10	7.63	0.1140	0.21	79.33	0.35
3.00	8.06	7.80	0.1038	0.39	87.00	1.26
5.00	8.11	7.32	0.1045	0.29	94.27	2.26
10.00	8.35	8.05	0.1124	0.94	90.60	3.99

ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 10 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Conc.i	pHi	pHf	Wt.chitosan	Conc.f	%Removal	Adsorption Capacity
Blank	10.01	9.69	0.1048	N/D	N/D	N/D
1.00	10.09	9.66	0.1030	0.21	78.67	0.38
3.00	10.00	9.73	0.1071	0.43	85.78	1.20
5.00	10.06	9.68	0.1056	0.57	88.67	2.10
10.00	10.01	9.81	0.1124	0.81	91.87	4.09

pHi	พีเอชของสารละลายตะกั่วก่อนทำการทดลอง
pHf	พีเอชของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง
Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)



ภาคผนวก ค
ผลการศึกษาปริมาณโคโตแซนที่เหมาะสม
ในการดูซับตะกั่วด้วยโคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย

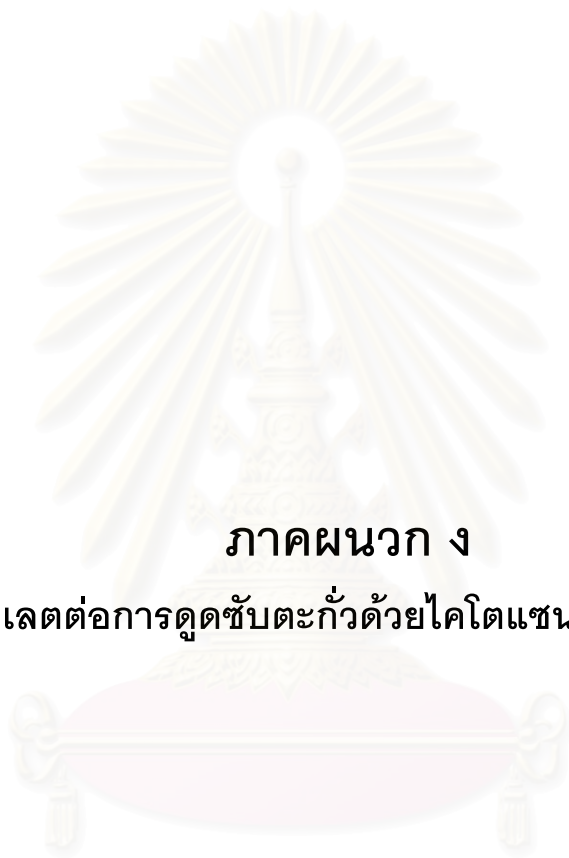
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาปริมาณไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่ายที่เหมาะสมในการดูดซับ ตะกั่วเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อ ลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 6 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Conc.i	Wt.chitosan (g)	Conc.f	%Removal	Adsorption Capacity
10.00	0.1004	1.02	89.83	4.47
10.00	0.3074	0.96	90.37	1.47
10.00	0.5047	0.92	90.83	0.90
10.00	0.7115	0.87	91.30	0.64
10.00	1.0015	0.66	93.43	0.47
10.00	1.5082	0.61	93.90	0.31
10.00	2.0148	0.71	92.87	0.23

Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ผลของสารสีเลตต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาผลของสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วต่ออีดีทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 โมลต่อโมล พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Pb:EDTA	pHi	pHf	Conc.f	Wt.chitosan	%Removal	Adsorption Capacity
1:0.5	4.01	4.71	2.05	0.3051	79.47	1.30
1:1	3.98	4.68	1.67	0.3157	83.30	1.32
1:2	4.02	4.70	1.96	0.3028	80.40	1.33
1:0.5	6.08	6.25	2.04	0.3102	79.60	1.28
1:1	6.02	5.92	1.85	0.3096	81.53	1.32
1:2	6.01	5.95	2.13	0.3046	78.70	1.29
1:0.5	8.08	6.79	2.17	0.3115	78.27	1.26
1:1	8.10	6.68	2.07	0.3075	79.30	1.29
1:2	8.15	6.89	2.20	0.3061	78.00	1.27
1:0.5	10.00	9.94	2.13	0.3031	78.70	1.30
1:1	10.01	9.87	2.24	0.3128	77.57	1.24
1:2	10.02	10.00	2.43	0.3064	75.67	1.23

Pb:EDTA	อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วต่ออีดีทีเอ (โมลต่อโมล)
pHi	พีเอชของสารละลายตะกั่วก่อนทำการทดลอง
pHf	พีเอชของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง
Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาผลของสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 โมลต่อโมล พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

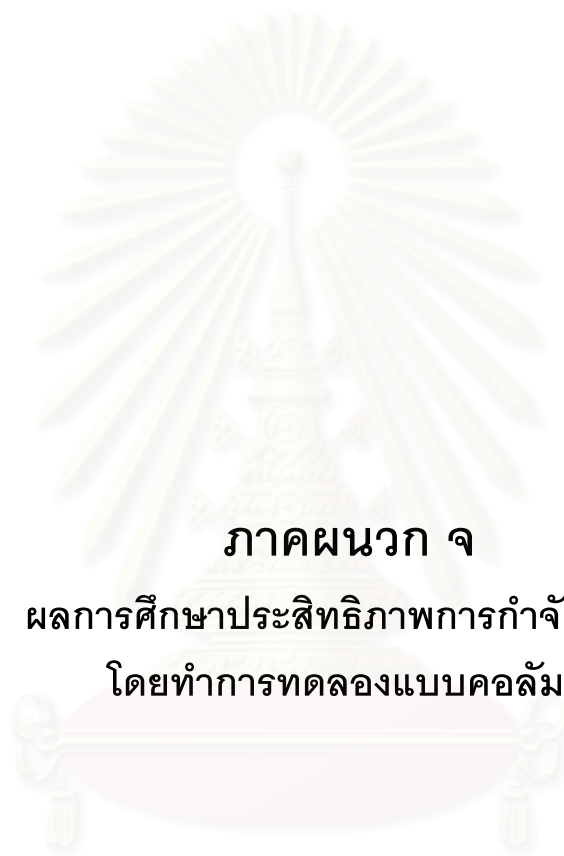
Pb:NTA	pHi	pHf	Conc.f	Wt.chitosan	%Removal	Adsorption Capacity
1:0.5	4.00	4.83	2.36	0.3007	76.43	1.27
1:1	4.01	4.89	2.74	0.3054	72.63	1.19
1:2	4.03	5.04	2.65	0.3052	73.50	1.20
1:0.5	6.16	6.50	2.44	0.3054	75.60	1.24
1:1	6.04	6.33	2.62	0.3068	73.80	1.20
1:2	6.10	6.34	2.64	0.3004	73.57	1.22
1:0.5	8.05	7.01	2.47	0.3053	75.33	1.23
1:1	8.10	6.92	2.53	0.3074	74.67	1.21
1:2	8.13	6.94	2.28	0.3021	77.20	1.28
1:0.5	10.00	9.78	1.35	0.3065	86.47	1.41
1:1	10.00	9.77	1.62	0.3031	83.83	1.38
1:2	10.00	9.81	2.15	0.3046	78.47	1.29

Pb:NTA	อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วต่อเอ็นทีเอ (โมลต่อโมล)
pHi	พีเอชของสารละลายตะกั่วก่อนทำการทดลอง
pHf	พีเอชของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง
Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)

ตารางที่ ๓.3 ผลการศึกษาผลของสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วต่อกรดทาทริกเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 โมลต่อโมล พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง

Pb:Tartaric	pHi	pHf	Conc.f	Wt.chitosan	%Removal	Adsorption Capacity
1:0.5	4.00	4.34	1.94	0.3057	80.63	1.32
1:1	4.00	4.45	2.81	0.3041	71.90	1.18
1:2	4.00	4.40	2.61	0.3019	73.93	1.22
1:0.5	6.10	6.08	0.59	0.3103	94.07	1.52
1:1	6.05	6.09	0.39	0.3067	96.13	1.57
1:2	6.12	6.33	0.47	0.3095	95.27	1.54
1:0.5	8.09	6.91	0.32	0.3016	96.83	1.61
1:1	8.10	6.87	0.14	0.3066	98.63	1.61
1:2	8.16	6.95	0.34	0.3031	96.57	1.56
1:0.5	10.00	9.83	0.32	0.3083	96.77	1.57
1:1	10.00	9.81	0.60	0.3069	94.03	1.53
1:2	10.00	9.89	0.38	0.3060	96.17	1.57

Pb:Tartaric	อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วต่อทาทริก (โมลต่อโมล)
pHi	พีเอชของสารละลายตะกั่วก่อนทำการทดลอง
pHf	พีเอชของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง
Wt.chitosan	น้ำหนักของไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย (กรัม)
Conc.i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Conc.f	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วหลังทำการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
% Removal	ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย (%)
Adsorption capacity	ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมไคโตแซน)



ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว

โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วโดยการทดลองแบบ
คอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัม
ต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 6

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
	ลิตร	BV		
0	0	0	0	100.00
15 นาที	0.05	11.11	0	100.00
30 นาที	0.10	22.22	0	100.00
45 นาที	0.15	33.33	0	100.00
2	0.40	88.89	0.86	91.40
3	0.60	133.33	1.27	87.33
4	0.80	177.78	3.57	64.27
6	1.20	266.67	6.80	32.00
8	1.60	355.56	7.51	24.93
12	2.40	533.33	7.63	23.73
22	4.40	977.78	8.13	18.73
24	4.80	1066.67	8.27	17.33
28	5.60	1244.44	8.63	13.67
30	6.00	1333.33	8.73	12.67
32	6.40	1422.22	8.72	12.80
34	6.80	1511.11	8.73	12.67
40	8.00	1777.78	8.87	11.33
46	9.20	2044.44	9.14	8.60
48	9.60	2133.33	9.23	7.67
50	10.00	2222.22	9.39	6.07
52	10.40	2311.11	9.85	1.53
54	10.80	2400.00	10.00	0.00



ภาคผนวก ฉ

ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว
ด้วยโคไตเซนแบบโครงสร้างตาข่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของโคโตแซนทีพีเอส 6 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ โดยใช้โคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย 0.1 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 1 3 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสีย (มก./ล.)		ปริมาณตะกั่วที่ถูกกำจัด : x (มก./ล.)	ปริมาณโคโตแซนที่ใช้ ; m (กรัม)	ปริมาตรน้ำตัวอย่าง ; V(ลิตร)	(x/m)V : q (มก./ก.)	logCe	logq	Ce/q
ก่อนทดลอง : Co	หลังทดลอง : Ce							
1.00	0.23	0.77	0.1093	0.05	0.35	-0.64	-0.46	0.66
3.00	0.43	2.57	0.1088	0.05	1.18	-0.37	0.07	0.36
5.00	0.70	4.3	0.1068	0.05	2.01	-0.15	0.30	0.35
10.00	1.29	8.71	0.1075	0.05	4.05	0.11	0.61	0.32

ตารางที่ ๑.2 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของโคโตแซนที่พีเอช 6 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอิตีทีเอในน้ำเสีย ตะกั่วสังเคราะห์โดยใช้โคโตแซนแบบโครงสร้างตาข่าย 0.1 กรัม ที่ปริมาณตะกั่วต่อปริมาณอิตีทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1: 2 โมลต่อโมล

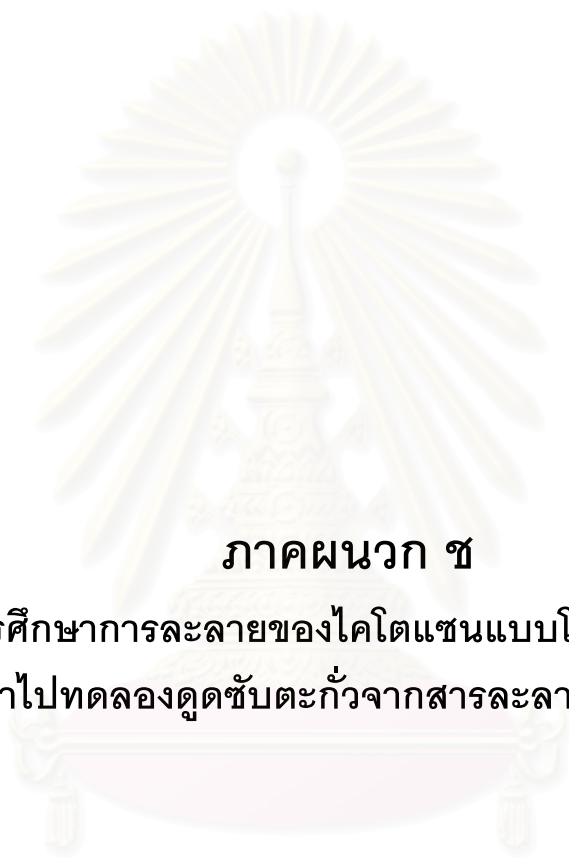
อัตราส่วน ตะกั่ว:อิตีทีเอ	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว ในน้ำเสีย (มก./ล.)		ปริมาณตะกั่วที่ถูก กำจัด : x (มก./ล.)	ปริมาณโคโตแซน ที่ใช้ : m (กรัม)	ปริมาตรน้ำ ตัวอย่าง : V (ลิตร)	(x/m)V : q (มก./ก.)	logCe	logq	Ce/q
	ก่อนทดลอง : Co	หลังทดลอง : Ce							
1:0.5	10.00	2.04	7.96	0.3102	0.05	1.28	0.31	0.10	1.59
1:1	10.00	1.85	8.15	0.3096	0.05	1.32	0.27	0.12	1.40
1:2	10.00	2.13	7.87	0.3046	0.05	1.29	0.33	0.11	1.65

ตารางที่ ๓.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของโคโตนที่พีเอช 6 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอในน้ำเสีย ตะกั่วสังเคราะห์ โดยใช้โคโตนแบบโครงร่างตาข่าย 0.1 กรัม ที่ปริมาณตะกั่วต่อปริมาณเอ็นทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1: 2 โมลต่อโมล

อัตราส่วน ตะกั่ว:เอ็นทีเอ	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว ในน้ำเสีย (มก./ล.)		ปริมาณตะกั่วที่ถูก กำจัด : x (มก./ล.)	ปริมาณโคโตน ที่ใช้ : m (กรัม)	ปริมาตรน้ำ ตัวอย่าง : V (ลิตร)	(x/m)V : q (มก./ก.)	logCe	logq	Ce/q
	ก่อนทดลอง : Co	หลังทดลอง : Ce							
1:0.5	10.00	2.44	7.56	0.3054	0.05	1.24	0.39	0.09	1.97
1:1	10.00	2.62	7.38	0.3068	0.05	1.20	0.42	0.08	2.18
1:2	10.00	2.64	7.36	0.3004	0.05	1.22	0.42	0.09	2.16

ตารางที่ ๑.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของโคโตนที่พีเอช 6 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริกในน้ำเสีย ตะกั่วสังเคราะห์โดยใช้โคโตนแบบโครงร่างตาข่าย 0.1 กรัม ที่ปริมาณตะกั่วต่อปริมาณกรดทาทริกเท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1: 2 มิลต่อ มิล

อัตราส่วน ตะกั่ว:ทาทริก	ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว ในน้ำเสีย (มก./ล.)		ปริมาณตะกั่วที่ถูก กำจัด : x (มก./ล.)	ปริมาณโคโตน ที่ใช้ : m (กรัม)	ปริมาตรน้ำ ตัวอย่าง : V (ลิตร)	(x/m)V : q (มก./ก.)	logCe	logq	Ce/q
	ก่อนทดลอง : Co	หลังทดลอง : Ce							
1:0.5	10.00	0.59	9.41	0.3103	0.05	1.52	-0.23	0.18	0.39
1:1	10.00	0.39	9.61	0.3067	0.05	1.57	-0.41	0.19	0.25
1:2	10.00	0.47	9.53	0.3095	0.05	1.54	-0.33	0.19	0.31



ภาคผนวก ช

ผลการศึกษการละลายของโคโตแซนแบบโครงร่างตาข่าย
หลังนำไปทดลองดูดซับตะกั่วจากสารละลายที่สภาวะต่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการละลายของโคโตนแบบโครงร่างตาข่ายหลังจากนำไปทดลองดูดซับตะกั่ว เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 6

ภาวะ	[Pb]เริ่มต้น (ppm)	น้ำหนักโคโตน (g)	ค่าTOC (mg/L)	% การละลาย
เวลา 5 นาที	10.00	0.1067	3.573	3.3486
เวลา 10 นาที	10.00	0.1046	3.331	3.1845
เวลา 15 นาที	10.00	0.1074	3.948	3.6760
เวลา 30 นาที	10.00	0.1086	3.713	3.4190
เวลา 1 ชั่วโมง	10.00	0.1051	3.843	3.6565
เวลา 2 ชั่วโมง	10.00	0.1064	4.181	3.9295
เวลา 4 ชั่วโมง	10.00	0.1027	4.472	4.3544
เวลา 6 ชั่วโมง	10.00	0.1050	4.989	4.7514
เวลา 12 ชั่วโมง	10.00	0.1081	4.713	4.3599
เวลา 24 ชั่วโมง	10.00	0.1062	4.918	4.6309
เวลา 48 ชั่วโมง	10.00	0.1067	4.458	4.1781

ตารางที่ ข.2 ผลการการละลายของโคโคแตนแบบโครงสร้างตาข่ายหลังจากนำไป ทดลอง
ดูดซับตะกั่ว เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 1 3 5 และ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 8 และ 10 เวลาสัมผัสเท่ากับ 4
ชั่วโมง

ภาวะ	[Pb]เริ่มต้น (ppm)	น้ำหนักโคโคแตน (g)	ค่าTOC (mg/L)	% การละลาย
pH 4	0.00	0.1069	5.158	4.8251
	1.00	0.1089	5.660	5.1974
	3.00	0.1129	6.302	5.5819
	5.00	0.1121	6.022	5.3720
	10.00	0.1073	5.337	4.9739
pH 6	0.00	0.1021	4.610	4.5152
	1.00	0.1093	5.390	4.9314
	3.00	0.1088	6.374	5.8585
	5.00	0.1068	5.429	5.0833
	10.00	0.1075	5.125	4.7674
pH 8	0.00	0.1139	5.054	4.4372
	1.00	0.1140	5.459	4.7886
	3.00	0.1038	5.668	5.4605
	5.00	0.1045	4.591	4.3933
	10.00	0.1135	4.522	3.9841
pH 10	0.00	0.1048	5.616	5.3588
	1.00	0.1030	5.690	5.5243
	3.00	0.1071	5.841	5.4538
	5.00	0.1056	5.613	5.3153
	10.00	0.1124	4.935	4.3906

ตารางที่ ช.3 ผลการการละลายของโคโตะแซนแบบโครงร่างตาข่ายหลังจากนำไป ทดลอง
ดูดซับตะกั่ว เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 10
มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 6 เวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง ที่ปริมาณ
โคโตะแซนแตกต่างกัน

ภาวะ	[Pb]เริ่มต้น (ppm)	น้ำหนักโคโตะแซน (g)	ค่าTOC (mg/L)	% การละลาย
pH 6	10.00	0.1004	5.411	5.3894
	10.00	0.3074	9.579	3.1161
	10.00	0.5047	12.88	2.5520
	10.00	0.7115	16.08	2.2600
	10.00	1.0015	22.38	2.2346
	10.00	1.5082	29.93	1.9845
	10.00	2.0148	38.79	1.9253

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฅ

คุณสมบัติของโคโตเซนผงที่นำมาเตรียมโคโตเซนแบบโครงสร้างตาข่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฅ.1 คุณสมบัติของไคโตแซนแบบผงที่นำมาใช้เตรียมไคโตแซนแบบโครงร่าง
ตาข่าย

รายการ	มาตรฐาน
วัตถุประสงค์	เปลือกกุ้งสด
ดีอะซิติลเลชัน	มากกว่า 90%
ลักษณะ	สีขาวถึงเหลืองนวล
ความชื้น	น้อยกว่า 10 %
พื้นที่จำเพาะ	8.61 ตารางเมตรต่อกรัม
ความหนืด	น้อยกว่า 1% (mPa.S(cPs)) [†]
มวลโมเลกุล	50,000 – 300,000
ความสามารถในการละลาย	มากกว่า 99.9% (1% ของไคโตแซนใน 1% ของกรดอะซิติก)

หมายเหตุ : [†] 1% ของสารละลายใน 1% ของกรดอะซิติก วัดด้วยเครื่องวัดความหนืดของ
Vrookfield LVT, ที่อุณหภูมิ 25 °c, ความเร็วรอบในการกวนที่ 30 rpm.



ภาคผนวก ญ

มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

“น้ำเสีย” หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในนิคมอุตสาหกรรมนั้นด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

“การบำบัดน้ำเสีย” หมายความว่า กระบวนการทำหรือปรับปรุงน้ำเสียเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 (พ.ศ.2535) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม แต่ทั้งนี้ห้ามมิให้ใช้วิธีการทำให้เจือจาง

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ ญ.1

ตารางที่ ญ.1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	- 5.5 – 9.0	- pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	- ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105° C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	- ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	- กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)

ตารางที่ ๑. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
4. อุณหภูมิ (Temperature)	- ไม่เกิน 40°C	- เครื่องวัดอุณหภูมิ วัด ขณะที่ทำการเก็บตัวอย่าง
5. สีหรือกลิ่น	- ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	- ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	- ไม่เกิน 0.1 มก./ล.	- Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	- ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	- กลิ่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	- สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำ มันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	- Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	- กลิ่นและตามด้วยวิธี 4- Amino-antipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	- Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือ กำจัดศัตรูพืช หรือ สัตว์ (Pesticide)	- ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่ กำหนด	- Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	- ไม่เกิน 20 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำ ทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	- Azide Modification ที่ อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน

ตารางที่ ๑.1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	- ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	- Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	- ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	- Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
1. สังกะสี	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	- Atomic Absorption Spectrometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductive Coupled Plasma : ICP
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	- ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	- ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
4. ทองแดง (Cu)	- ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
5. แคดเมียม (Cd)	- ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
6. แบเรียม (Ba)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	- ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. อาร์เซนิก (As)	- ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
11. เซเลเนียม (Se)	- ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	- Atomic Absorption
12. ปรอท (Hg)	- ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Cold Vapor Technique

ที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) วันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

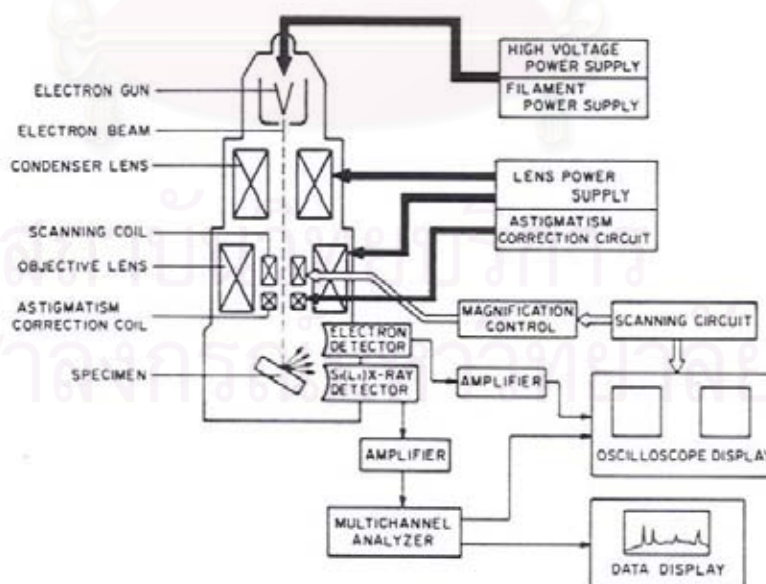
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน
และการเตรียมตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเป็นเครื่องมือวิจัยที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย หลังจากเริ่มเข้าสู่ตลาดการค้าเป็นครั้งแรกในปีค.ศ. 1965 ที่ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับให้ข้อมูลในรูปแบบของไมโครกราฟ (Micro-graphs) ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีเทคนิคการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่ม Energy-dispersive Detector ในการวิเคราะห์ในรูปแบบของการเอ็กซ์เรย์ โดย SEM จะมีอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการเอ็กซ์เรย์ (ระบบ SEM/XRF) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการวิจัยในด้านชีววิทยา การแพทย์ โลหะการ วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ ธรณีวิทยา การเกษตร ไฟฟ้า และ อากาศ

ระบบ SEM/XRF สามารถแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการวิเคราะห์วัสดุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้เป็นอย่างดี โดยสามารถสแกนและวิเคราะห์ภาพได้ในเวลาเดียวกันภายใต้การควบคุมของระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งผู้วิเคราะห์สามารถเลือกขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบต่างๆ เองได้ การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงดังรูปที่ ๑.1 ซึ่งแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอนอิสระได้จากการปล่อยความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของหลอดไส้ทั้งสแตนด์ในห้องเผาไหม้ ลำแสงของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกโฟกัสไปยังพื้นผิวของตัวอย่างโดยอิเล็กโตรแมคเนติกเลนส์ 2 ชั้น เลนส์ดังกล่าวจะลดการขยายตัวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (เส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 4-6 มิลลิเมตร) ให้เหลือประมาณ 100 อังสตรอม เพื่อให้ลำแสงของอิเล็กตรอนสามารถสแกนผ่านตัวอย่างและแสดงในจอรับภาพขนาดสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้



รูปที่ ๑.1 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

อิเล็กตรอนขั้นที่สอง (Secondary Electron) เป็นการปล่อยอิเล็กตรอนอีกชนิดหนึ่งที่เป็นผลมาจากการดึงดูดกันของลำแสงซึ่งอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำจะถูกปล่อยออกมาจากตัวอย่าง โดยลำแสงของอิเล็กตรอนขั้นแรก (Primary Electron) และถูกเก็บไว้ด้วย Scintillation Counter ผลที่ได้จาก Scintillation Counter จะเชื่อมต่อกับตัวแสดงรังสีขั้วบวก (Cathode ray display) โดยการหักเหของอิเล็กตรอนโพรบผ่านตัวอย่างและการหักเหในตัวแสดงรังสีขั้วบวกจะถูกสังเคราะห์ด้วยขดลวดสำหรับสแกนภาพ 2 ชุดในทำนองเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดภาพของตัวอย่างบนจอรับภาพ โดยภาพที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันตามประสิทธิภาพของการผลิตอิเล็กตรอนขั้นที่สองจากตำแหน่งที่ต่างกันของตัวอย่าง ประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่าง ในลักษณะเดียวกันนี้อิเล็กตรอนที่มาจากลำแสงของกล้องจุลทรรศน์สามารถแตกตัวออกจากอนุภาคและใช้ถ่ายภาพอนุภาคได้ พลังงานที่มาจากแตกตัวกลับของอิเล็กตรอนนี้มีความเร็วต่อเลขอะตอมเฉลี่ยของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งจะช่วยในการจำแนกอนุภาคออกจากตัวอย่างหรือออกจากกันได้

ลำแสงของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบยังเป็นเหตุให้เกิดรังสีเอ็กซ์ (X rays) ที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวอย่างที่มีปริมาตรประมาณ 1-3 ไมโครคิวบิกเมตร รังสีเอ็กซ์นี้จะถูกเก็บไว้และวิเคราะห์ด้วยระบบเอ็กซ์เรย์สเปคโตรมิเตอร์ ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของธาตุต่างๆ บนพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ เครื่องให้รังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยไดโอดของลิเทียม-ซิลิกอนที่ติดตั้งอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดตามขวางสองตัว ซึ่งมีตัวถ่วงความดันไฟฟ้าทำงานอยู่ โฟตอนของรังสีเอ็กซ์จะสร้างอิเล็กตรอนคู่ว่างออกมา และพลังงานของรังสีดังกล่าวได้จากจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้น (3.8 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับอิเล็กตรอนคู่ว่างแต่ละคู่ในซิลิกอน ที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน) อิเล็กตรอนคู่ว่างดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วอิเล็กโทรดเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ (Current pulse) กระแสไฟฟ้างกล่าวจะถูกขยายและเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมประจุจากเครื่องวัด แรงดันนี้จะผ่านไปสู่มัลติชานแนลอะนาลิเซอร์ (Multichannel Analyzer, MCA) ซึ่งเป็นแหล่งที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเปลี่ยนเป็นตัวเลขดิจิทัลที่ใช้เป็นที่อยู่สำหรับเก็บสำรองข้อมูลในการคำนวณไว้ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งในเวลานี้เครื่องวัดมีความพร้อมที่จะรับกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ได้อีกครั้ง โดยระยะเวลาทั้งหมดจะเกิดขึ้นประมาณ 10 ไมโครวินาที

ที่ ม า : Hopke, P. K. 1985. Receptor Modeling in Environmental Chemistry. New York : John Wiley & Sons.

การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการทำให้แห้งที่จุดวิกฤติ (Critical Point Drying, CPD)

ตัวอย่างที่จะนำมาใช้กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนต้องอยู่ในสถานะที่แห้งซึ่งโคโคโตแซนที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีลักษณะเปื่อยกและมีความชื้นอยู่ในตัวอย่าง โดยวิธีการระเหยด้วยบรรยากาศจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของโคโคโตแซนหรือตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการเฉพาะที่มีความเหมาะสมต่อตัวอย่างทางชีววิทยาที่มีความละเอียดอ่อน ตัวอย่างโดยทั่วไปจะมีน้ำเป็นตัวกลางซึ่งมีแรงดึงดูดกับอากาศสูง แรงดึงดูดนี้สามารถกำจัดได้โดยการแทนที่ของเหลวภายในตัวอย่างด้วยสารที่มีแรงดึงดูดต่ำกว่า ซึ่งจะเป็นการลดความเสี่ยงจากการระเหยด้วยบรรยากาศ อย่างไรก็ตามได้มีเทคนิคที่ช่วยลดแรงดึงดูดดังกล่าวให้เป็นศูนย์ได้ที่เรียกว่าการทำให้แห้งที่จุดวิกฤติ (Critical Point Drying, CPD) ถ้าอุณหภูมิของก๊าซที่ถูกเปลี่ยนเป็นของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ส่วนผิวหน้าของเหลวที่มองเห็นเป็นเส้นโค้งนั้นเรียบขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงแรงดึงดูดที่ลดลง และถ้าแรงดึงดูดมีค่าลดลงมากๆ จะทำให้ผิวหน้าของของเหลวเกิดความไม่เสถียรและหายไป ในที่สุด เมื่อถึงจุดวิกฤติ (Critical Point) จะทำให้ของเหลวเปลี่ยนไปเป็นก๊าซโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอย่างฉับพลันอีกไม่ได้ และถ้าตัวอย่างยังเป็นของเหลวอยู่ระหว่างเกิดกระบวนการดังกล่าว มันจะเปลี่ยนสภาพจากสถานะเปื่อยกไปเป็นสถานะแห้ง ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการสัมผัสกับพื้นผิวซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดความเสียหายจากแรงดึงดูด

แม้ว่าในทางปฏิบัติการได้มาซึ่งสถานะวิกฤติไม่ได้มีส่วนช่วยในเรื่องชีววิทยา เนื่องจากตัวอย่างอาจได้รับความเสียหายจากความร้อนหากพยายามจะใช้เทคนิคดังกล่าวในการกำจัดน้ำออกจากตัวอย่างโดยตรง ดังนั้นวิธีการทำให้แห้งที่จุดวิกฤติจึงใช้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารที่ธรรมดามากที่สุดมาใช้ในการแทนที่ของเหลวภายในตัวอย่าง โดยเรียกว่า "Transitional Fluid" ดังตารางที่ ฎ1 ซึ่งแสดงค่าคงที่ที่สถานะวิกฤติของสารบางชนิดที่พบได้ทั่วไป อย่างไรก็ตามคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถผสมเข้ากับน้ำได้ ดังนั้นน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างจำเป็นต้องถูกแทนที่ด้วยของเหลวอื่นที่สามารถผสมกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เรียกว่า "Intermediate Fluid" ซึ่งในทางอุดมคติสามารถแทนที่น้ำภายในตัวอย่างได้ด้วยของเหลวที่เรียกว่า "Dehydration Fluid"

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฎ.1 ค่าคงที่ที่สภาวะวิกฤติของสารบางชนิดที่พบได้ทั่วไป

สาร	อุณหภูมิ °C	P.S.I.
ไฮโดรเจน	-234.5	294
ออกซิเจน	-118	735
ไนโตรเจน	-146	485
คาร์บอนไดออกไซด์	+31.1	1072
คาร์บอนมอนอกไซด์	-141.1	528
น้ำ	+374	3212

ขั้นตอนการทำให้แห้งที่สภาวะวิกฤติ (Critical Point Drying Stages)

1. Intermediate Stage

ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับการเกิด Dehydration และ Intermediate Fluids โดยจะเกิดขึ้นตามขั้นตอนที่จะกล่าวต่อไปนี้

น้ำ (ตัวอย่างเปียก) → อะซิโตน → คาร์บอนไดออกไซด์ → CPD (ตัวอย่างแห้ง)

ตามปกติตัวอย่างจะผ่านกระบวนการที่มีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของ Dehydration Fluid จนในที่สุดจะถูกแทนที่น้ำด้วย Intermediate Fluid อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีแรงตึงผิวต่ำ ตัวอย่างจึงไม่ได้รับความเสียหายจากการระเหยมากนักระหว่างเคลื่อนย้ายเข้าไปใน Chamber ซึ่งการผสมเข้ากันไม่ได้กับคาร์บอนไดออกไซด์ (Transitional Fluid) จะช่วยยืนยันถึงสภาวะที่น่าพึงพอใจหลังจากล้าง (Purging) ของกระบวนการ CPD ตั้งแต่ต้น

น้ำ (ตัวอย่างเปียก) → อะซิโตน → 30%* 100% → CO₂ ** → CPD (ตัวอย่างแห้ง)

หมายเหตุ

- 50/60/70/80/90 โดยทั่วไปอย่างละ 10 นาที

- ** ล้าง 3 ครั้ง

ตารางที่ ๒.2 Dehydration หรือ Intermediate Fluid สำหรับ CPD

สาร	แรงตึงผิว (dynes/cm.)
เอทานอล	23
อะซิโตน	24
ฟรียอน (113)	19
น้ำ	73

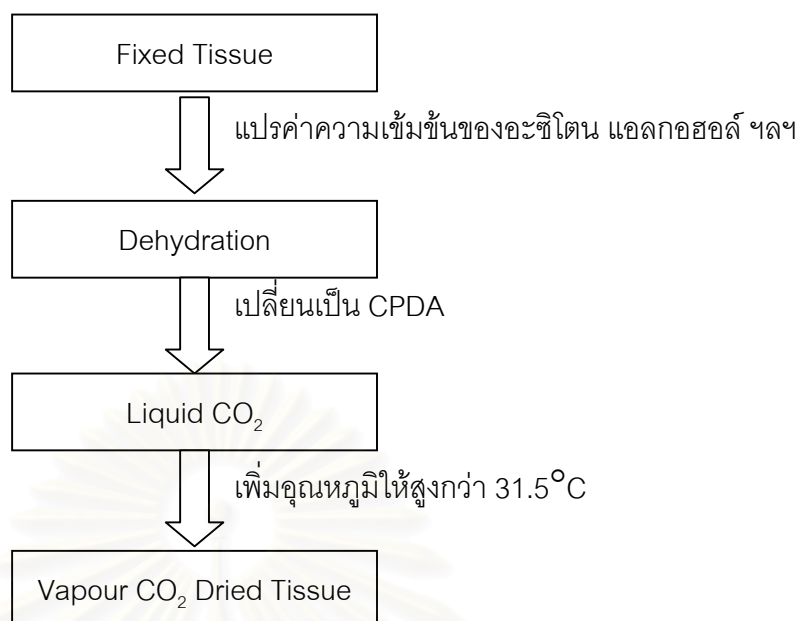
Chamber จะถูกล้างครั้งแล้วครั้งเล่าเพื่อจะแทนที่ Intermediate Fluid ด้วย Transitional Fluid หลังจากมีการเคลื่อนย้ายตัวอย่างเข้าไปสู่ Chamber จากนั้นกระบวนการทำให้แห้งที่จุดวิกฤตก็จะเริ่มต้นขึ้น

2. Transitional Stage

สภาวะที่ทำให้เกิดจุดวิกฤตจะได้จากคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอุณหภูมิ 31.1°C และความดัน 1072 psi ซึ่งได้รับจากมวลของก๊าซและความดันที่ถูกกำหนดไว้สำหรับอุณหภูมิคงที่เป็นชุดๆ ในห้องปฏิบัติการนั้นการใช้งาน CPD จะกำหนดปริมาตรที่ถูกแทนที่ด้วย Transitional Fluid ไว้ โดยตารางที่ ๒.3 เป็นตัวอย่าง Transitional Fluid ที่ใช้กันโดยทั่วไป ทั้งนี้ขั้นตอนการทำให้แห้งที่จุดวิกฤตสามารถสรุปได้ดังรูปที่ ๒

ตารางที่ ๒.3 Transitional Fluid สำหรับ CPD

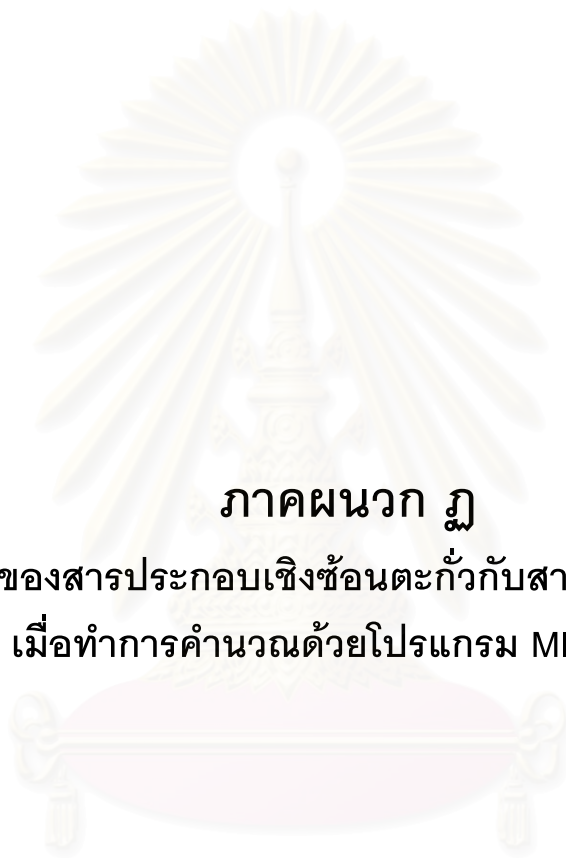
สาร	อุณหภูมิ, °C	ความดัน, psi
คาร์บอนไดออกไซด์	+31.1	1072
ฟรียอน 13	+28.9	562
ฟรียอน 23	+25.9	495
น้ำ	+374	3212



รูปที่ ๓.๒ ขั้นตอนการทำให้แห้งที่จุดวิกฤติ

ที่มา : "Technical Brief Critical Point Drying," Quorum Technologies No.1 (October 2002): 4-10.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



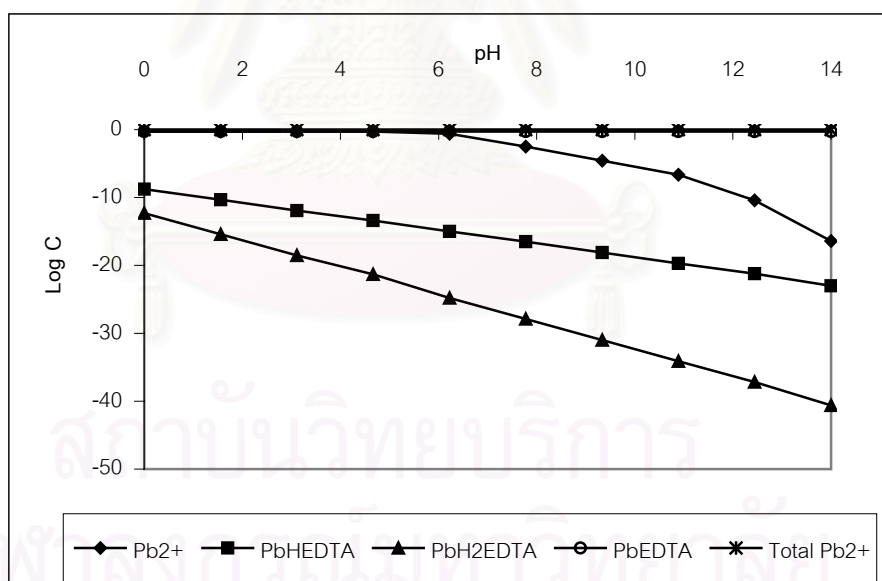
ภาคผนวก ฎ

การแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วกับสารซิลิเกตที่พีเอชต่างๆ
เมื่อทำการคำนวณด้วยโปรแกรม MINEQL+

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฎ.1 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลอีดีทีเอเท่ากับ 1:0.5

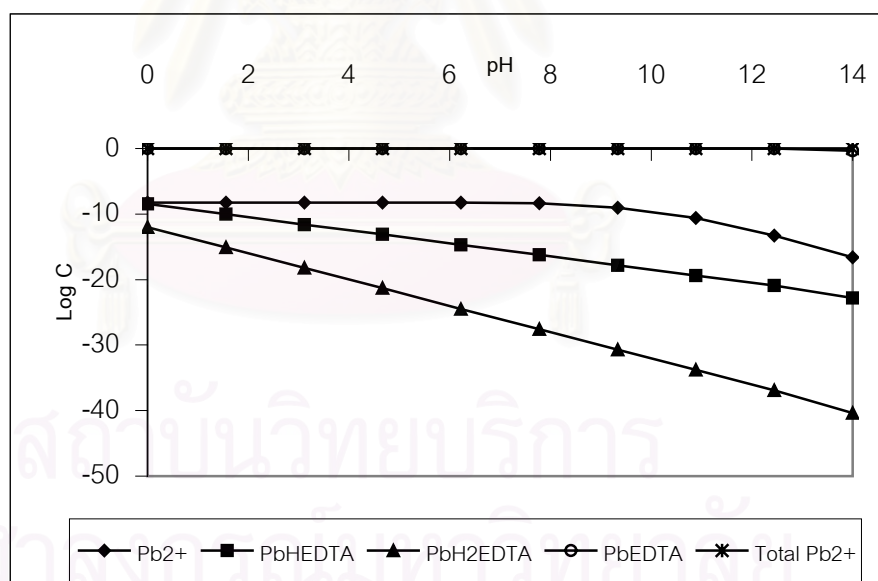
พีเอช	Pb ²⁺	PbHEDTA	PbH ₂ EDTA	PbEDTA	Total Pb ²⁺
0	-0.301	-8.77	-12.3	-0.301	0
1.556	-0.301	-10.3	-15.4	-0.301	0
3.111	-0.301	-11.9	-18.5	-0.301	0
4.667	-0.312	-13.4	-21.6	-0.301	0
6.222	-0.609	-15	-24.8	-0.301	0
7.778	-2.5	-16.5	-27.9	-0.301	0
9.333	-4.57	-18.1	-31	-0.301	0
10.889	-6.65	-19.7	-34.1	-0.301	0
12.444	-10.4	-21.2	-37.2	-0.301	0
14	-16.4	-23	-40.6	-0.301	0



รูปที่ ฎ.1 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลอีดีทีเอเท่ากับ 1 : 0.5

ตารางที่ ฎ.2 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลอีดีทีเอเท่ากับ 1:1

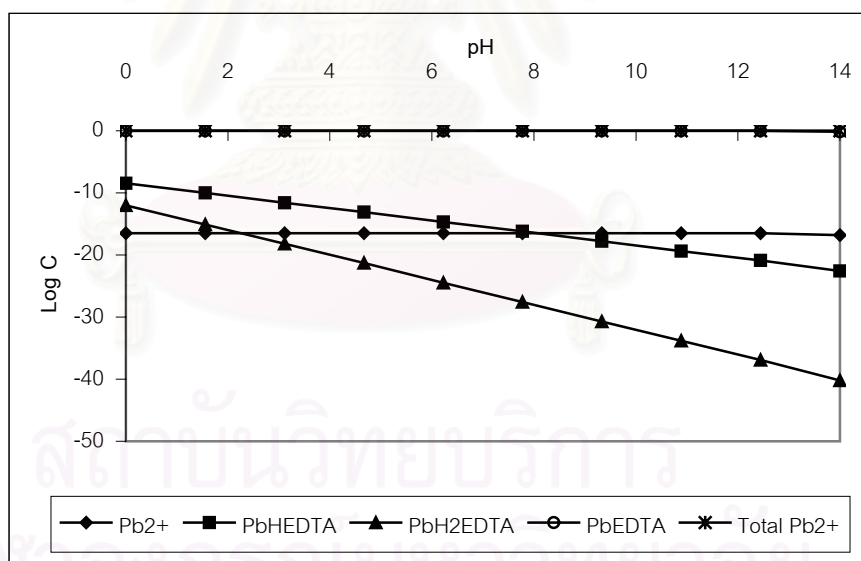
พีเอช	Pb ²⁺	PbHEDTA	PbH ₂ EDTA	PbEDTA	Total Pb ²⁺
0	-8.24	-8.46	-12	0	0
1.556	-8.24	-10	-15.1	0	0
3.111	-8.24	-11.6	-18.2	0	0
4.667	-8.24	-13.1	-21.3	0	0
6.222	-8.24	-14.7	-24.5	0	0
7.778	-8.35	-16.2	-27.6	0	0
9.333	-9.04	-17.8	-30.7	0	0
10.889	-10.6	-19.4	-33.8	0	0
12.444	-13.3	-20.9	-36.9	0	0
14	-16.6	-22.8	-40.4	-0.347	0



รูปที่ ฎ.2 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลอีดีทีเอเท่ากับ 1 : 1

ตารางที่ ฎ.3 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลอีดีทีเอเท่ากับ 1:2

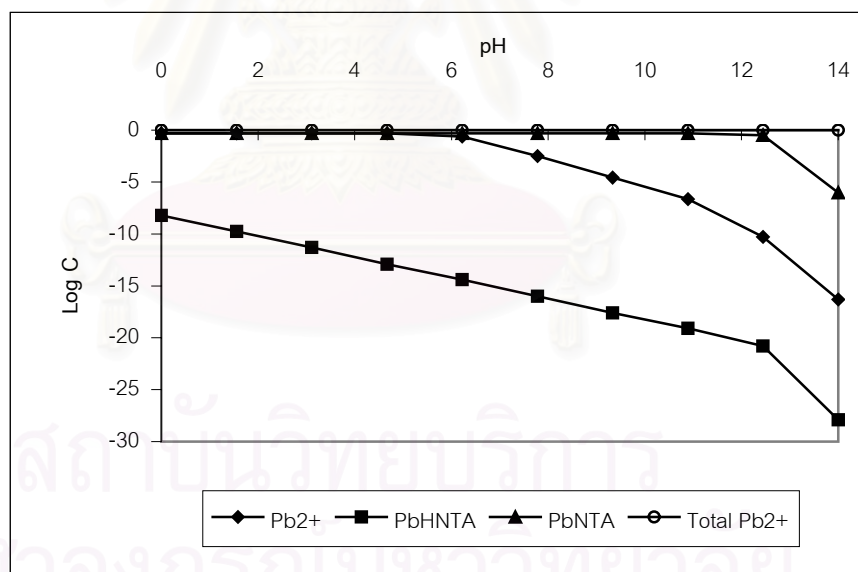
พีเอช	Pb ²⁺	PbHEDTA	PbH ₂ EDTA	PbEDTA	Total Pb ²⁺
0	-16.5	-8.46	-12	0	0
1.556	-16.5	-10	-15.1	0	0
3.111	-16.5	-11.6	-18.2	0	0
4.667	-16.5	-13.1	-21.3	0	0
6.222	-16.5	-14.7	-24.5	0	0
7.778	-16.5	-16.2	-27.6	0	0
9.333	-16.5	-17.8	-30.7	0	0
10.889	-16.5	-19.4	-33.8	0	0
12.444	-16.5	-20.9	-36.9	0	0
14	-16.8	-22.6	-40.2	-0.177	0



รูปที่ ฎ.3 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วอีดีทีเอ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลอีดีทีเอเท่ากับ 1 : 2

ตารางที่ ฎ.4 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลเอ็นทีเอเท่ากับ 1:0.5

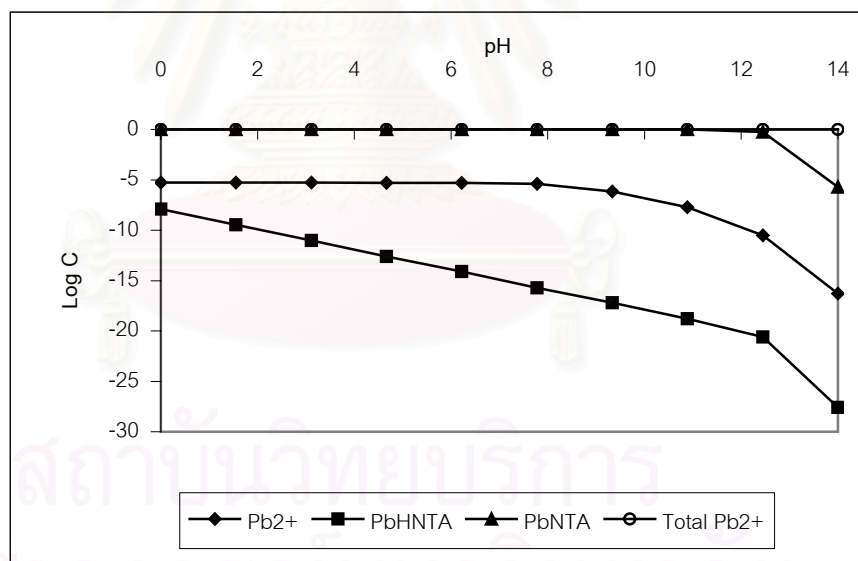
พีเอช	Pb ²⁺	PbHNTA	PbNTA	Total Pb ²⁺
0	-0.301	-8.22	-0.301	0
1.556	-0.301	-9.77	-0.301	0
3.111	-0.301	-11.3	-0.301	0
4.667	-0.312	-12.9	-0.301	0
6.222	-0.609	-14.4	-0.301	0
7.778	-2.5	-16	-0.301	0
9.333	-4.57	-17.6	-0.301	0
10.889	-6.65	-19.1	-0.301	0
12.444	-10.3	-20.8	-0.484	0
14	-16.3	-27.9	-6.03	0



รูปที่ ฎ.4 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลเอ็นทีเอเท่ากับ 1 : 0.5

ตารางที่ ฎ.5 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลเอ็นทีเอเท่ากับ 1:1

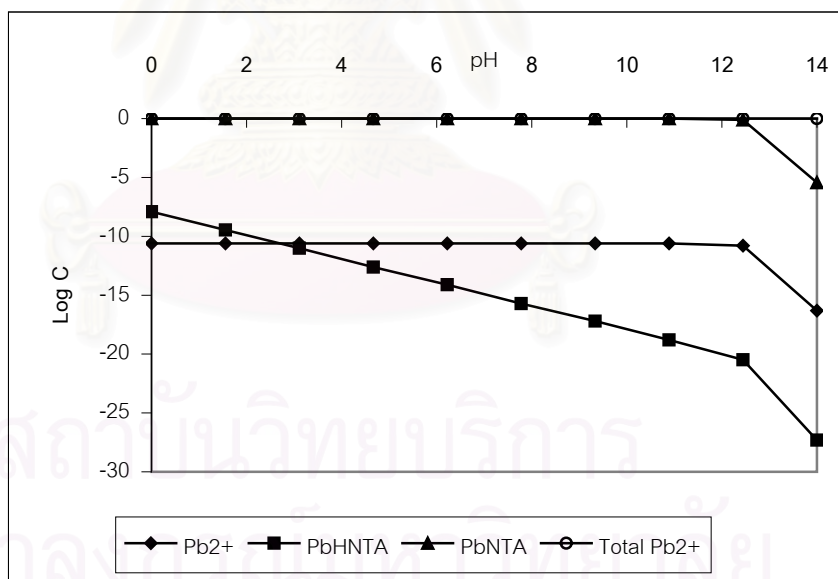
พีเอช	Pb ²⁺	PbHNTA	PbNTA	Total Pb ²⁺
0	-5.28	-7.92	0	0
1.556	-5.28	-9.47	0	0
3.111	-5.28	-11	0	0
4.667	-5.29	-12.6	0	0
6.222	-5.29	-14.1	0	0
7.778	-5.39	-15.7	0	0
9.333	-6.15	-17.2	0	0
10.889	-7.7	-18.8	-0.001	0
12.444	-10.5	-20.6	-0.254	0
14	-16.3	-27.6	-5.73	0



รูปที่ ฎ.5 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลเอ็นทีเอเท่ากับ 1 : 1

ตารางที่ ฎ.6 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลเอ็นทีเอเท่ากับ 1:2

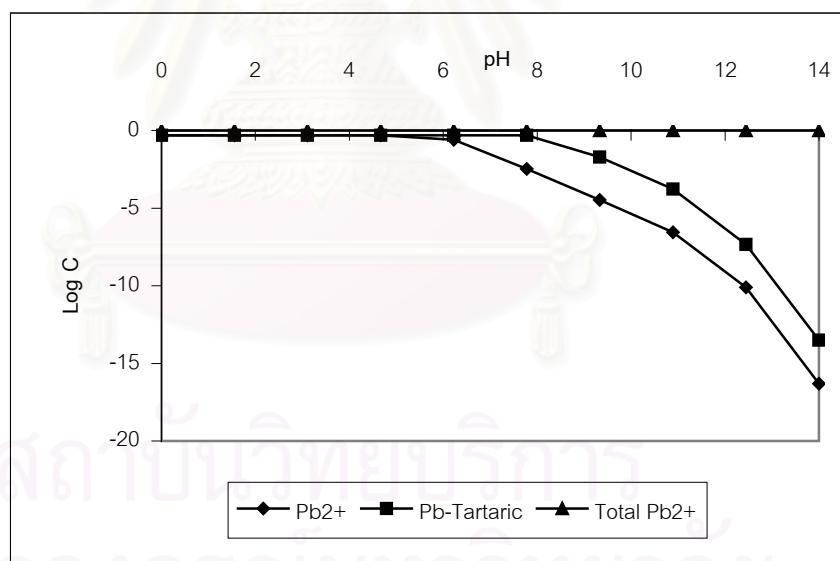
พีเอช	Pb ²⁺	PbHNTA	PbNTA	Total Pb ²⁺
0	-10.6	-7.92	0	0
1.556	-10.6	-9.47	0	0
3.111	-10.6	-11	0	0
4.667	-10.6	-12.6	0	0
6.222	-10.6	-14.1	0	0
7.778	-10.6	-15.7	0	0
9.333	-10.6	-17.2	0	0
10.889	-10.6	-18.8	0	0
12.444	-10.8	-20.5	-0.11	0
14	-16.3	-27.3	-5.43	0



รูปที่ ฎ.6 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วเอ็นทีเอที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลเอ็นทีเอเท่ากับ 1 : 2

ตารางที่ ๗.7 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริกที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลทาทริกเท่ากับ 1:0.5

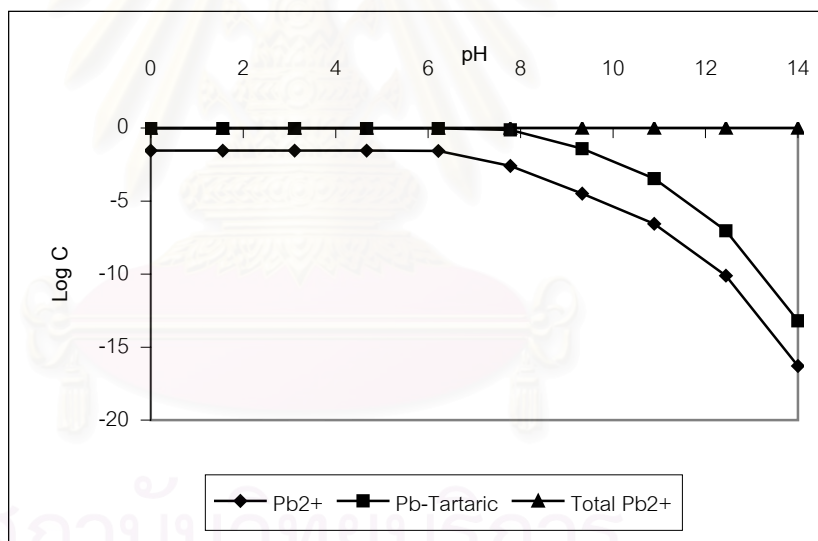
พีเอช	Pb ²⁺	Pb Tartaric	Total Pb ²⁺
0	-0.3	-0.302	0
1.556	-0.3	-0.302	0
3.111	-0.301	-0.302	0
4.667	-0.311	-0.302	0
6.222	-0.608	-0.302	0
7.778	-2.48	-0.398	0
9.333	-4.48	-1.72	0
10.889	-6.55	-3.77	0
12.444	-10.1	-7.34	0
14	-16.3	-13.5	0



รูปที่ ๗.7 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริก ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลทาทริกเท่ากับ 1 : 0.5

ตารางที่ ฎ.8 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริกที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลทาทริกเท่ากับ 1:1

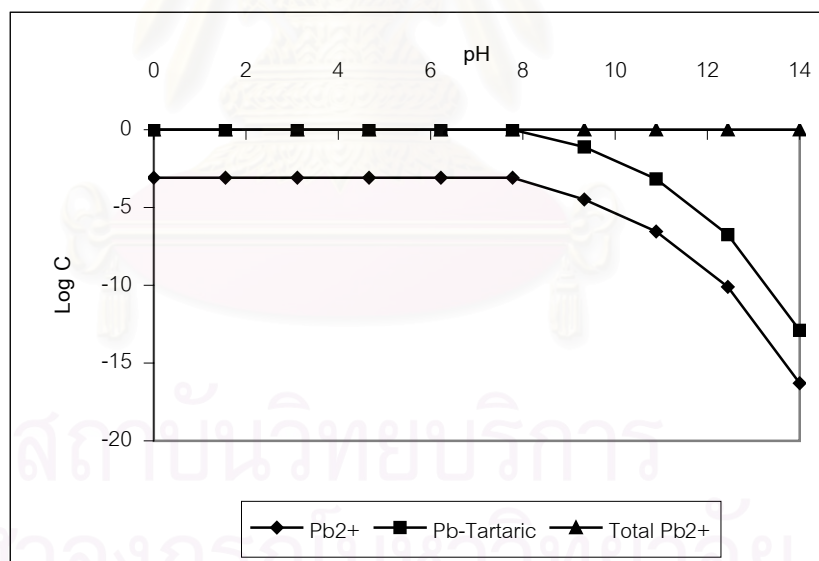
พีเอช	Pb ²⁺	Pb Tartaric	Total Pb ²⁺
0	-1.54	-0.013	0
1.556	-1.54	-0.013	0
3.111	-1.54	-0.013	0
4.667	-1.54	-0.013	0
6.222	-1.56	-0.013	0
7.778	-2.6	-0.126	0
9.333	-4.48	-1.42	0
10.889	-6.55	-3.47	0
12.444	-10.1	-7.04	0
14	-16.3	-13.2	0



รูปที่ ฎ.8 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริก ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลทาทริกเท่ากับ 1 : 1

ตารางที่ ๙.9 ผลของการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริกที่พีเอชต่างๆ ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลทาทริกเท่ากับ 1:2

พีเอช	Pb ²⁺	Pb Tartaric	Total Pb ²⁺
0	-3.08	0	0
1.556	-3.08	0	0
3.111	-3.08	0	0
4.667	-3.08	0	0
6.222	-3.08	0	0
7.778	-3.09	-0.004	0
9.333	-4.49	-1.12	0
10.889	-6.55	-3.17	0
12.444	-10.1	-6.74	0
14	-16.3	-12.9	0



รูปที่ ๙.9 ความสัมพันธ์ของพีเอชและค่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วทาทริก ที่อัตราส่วนโมลสารละลายตะกั่วต่อโมลทาทริกเท่ากับ 1 : 2

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเอมมา อาสนจินดา เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2520 ที่ประเทศอังกฤษ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปี พ.ศ. 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย