

การศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีก



นริศรา นพวารุมาศ  
พัชรา เสริมตระกูล  
วิษุตา สุขสำอาง

รพ.  
๗๐ ๒๕๓๓  
๒๕๔๕

เลขหม.....  
เลขทะเบียน 49252  
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2547

b.....  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2545

# Study of Cadmium Adsorption by using Cuttle Bone



Narisara Nopwarumart  
Patchara Sermtrakool  
Witchuta Suksumang

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for**

**the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang**

**Academic Year 2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีก

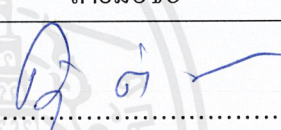
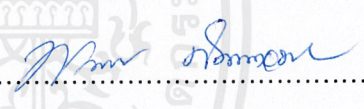
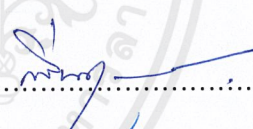
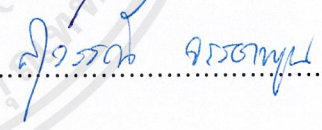
นักศึกษา นางสาว นริศรา นพวารุมาศ  
นางสาว พัชรา เสริมตระกูล  
นางสาว วิชชุดา สุขสำอาง

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์  
ดร. สุวรรณณี จรรยาพูน

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์	
กรรมการ อาจารย์ พรทิพย์ ศัพทอนันต์	
กรรมการ อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
กรรมการ ดร. สุวรรณณี จรรยาพูน	



(รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง การศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีก  
 นักศึกษา นริศรา นพวารุมาศ  
 พัชรา เสริมตระกูล  
 วิษุตา สุขสำอาง

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์  
 สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
 ปีการศึกษา 2545  
 อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์  
 ดร. สุวรรณณี จรรยาพูน

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีกเป็นตัวดูดซับซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น โดยทำการทดสอบแบบ batch เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของกระดองหมีก พบว่ากระดองหมีกขนาด 100-200 เมช สามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้อัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 150 รอบ/นาที และใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสเท่ากับ 1 ชั่วโมง ค่าคงที่ที่คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ Freundlich มีค่าเท่ากับ 2.235 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมกระดองหมีก และในการทดสอบโดยใช้น้ำชะจากกองขยะที่มีแคดเมียมปนเปื้อน จากผลการบำบัดน้ำชะจากกองขยะกระดองหมีกสามารถกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนได้ร้อยละ 74.28

คำสำคัญ : แคดเมียม, กระดองหมีก, การดูดซับ

<b>Special Project Title</b>	Study of Cadmium Adsorption by using Cuttle Bone
<b>Name</b>	Narisara Nopwarumart Patchara Sermrakoon Witchuta Suksumang
<b>Department</b>	Chemistry Faculty of Science
<b>Program</b>	Environmental Resource of Chemistry
<b>Academic Year</b>	2002
<b>Special Project Advisor</b>	Ajarn Glinsukol Suwannarat Dr. Suwannee Junyapoon

### ABSTRACT

The purpose of this research is to study the capability of cadmium adsorption by using Cuttle Bone which are residual materials available locally. Batch adsorption tests were used for study the optimum conditions of cadmium adsorption of Cuttle Bone and the adsorption efficiency. From the experiment, the Cuttle Bone which was sized to 100-200 mesh was found to be the best size for cadmium adsorption at pH 7 with mixing agitation at 150 rounds per minute for 1 hour of contact time. The adsorption constant from Freundlich adsorption isotherm was found to be 2.235 milligram cadmium per gram of Cuttle Bone [  $\log(X/M) = 0.7516 \log C_e + 0.3493$  ]. Leachate collected from refuse dump at Aonnuch landfill was used as a test sample. The results showed that the Cuttle Bone could remove cadmium from leachate for 74.28 percent.

**Keyword : Cadmium, Cuttle Bone, Adsorption**

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ สืบเนื่องมาจากความช่วยเหลือ และความกรุณาของทุก ๆ ท่าน ทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และอาจารย์ สุวรรณิ จรรยาพูน ที่กรุณาติดตามตรวจสอบ ดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด และให้คำปรึกษาตลอดเวลา ดิฉันจนผลงานสำเร็จลงได้ในที่สุด

ผศ. คณิตา ตังคณานุรักษ์ และอาจารย์ พรทิพย์ ศัพทอนันต์ ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องการทำรายงาน รวมถึงท่านอาจารย์ภาคเคมีทุกท่าน อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมีทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านอย่างเต็มที่

อีกทั้งแม่บ้านของโรงอาหารคณะครุศาสตร์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการเก็บภาชนะที่ใช้ในการทดลอง และเจ้าหน้าที่ของอาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ที่ให้อุปกรณ์และเครื่องร่อนในการแยกขนาดสำหรับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ โรงกำจัดขยะอ่อนนุช และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความกรุณาในการช่วยเหลือทำการเก็บน้ำเสียจริงจากน้ำชะของกองขยะที่มีแคะเมียมปนเปื้อนอยู่ ทำให้โครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ และเป็นกำลังตลอดจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอใจเพื่อน ๆ ในสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณของทุกท่าน และถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความกรุณา ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี และอดทนกับโครงการพิเศษมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

นริศรา นพวารุมาศ

พัชรา เสริมตระกูล

วิษชุดา สุขสำอาง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	4
2.2 โลหะหนัก	17
2.2.1 แคดเมียม	17
2.3 กระจกหมีก	20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 วิธีการทดลอง	24
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากกระจกหมีก	24
3.2.2 ศึกษาผลของขนาดกระจกหมีกต่อการดูดซับ	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.2.3	ศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ	25
3.2.4	ศึกษาผลของอัตราเร็วในการปั่นกวตต่อการดูดซับ	25
3.2.5	ศึกษาเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ	26
3.2.6	ศึกษาค่าไอโซเทอมของการดูดซับ	26
3.2.7	ศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมจากน้ำชะกองขยะ	27
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	
4.1	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของกระดองหมีก	28
4.2	ผลของขนาดของกระดองหมีกต่อการดูดซับ	31
4.3	ผลของพีเอชต่อการดูดซับ	33
4.4	ผลของอัตราเร็วการปั่นกวตต่อการดูดซับ	34
4.5	ผลของเวลาในการสัมผัส	35
4.6	ผลการศึกษาของไอโซเทอม	36
4.7	ผลการศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริง	38
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1	คุณสมบัติของกระดองหมีก	39
5.2	สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมของกระดองหมีก	39
5.3	ข้อเสนอแนะ	40
<b>บรรณานุกรม</b>		41
<b>ภาคผนวก</b>		
ภาคผนวก ก.	การเตรียมสารเคมี	42
ภาคผนวก ข.	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี	44
ภาคผนวก ค.	คุณสมบัติน้ำชะจากกองขยะอ่อนนุชเก็บจากบ่อที่จุดเทกอง	64
ภาคผนวก ง.	ตารางแสดงผลการทดลอง	65
ภาคผนวก จ.	การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริง	74

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ปริมาณของเสียอันตรายแยกตามประเภทและปี	2
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ (Dean,1942)	18
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของหมึกกระดองเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluoresence	29
ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการศึกษาไอโซโทม	36
ตารางที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ของ $N_j/N_0$ ที่อุณหภูมิ 2000 K และ 3000 K	47
ตารางที่ ข.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	53
ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของน้ำชะจากกองขยะอ่อนนุชเก็บจากบ่อที่จุดเทกอง	64
ตารางที่ ง. 1 ตารางแสดงผลของขนาดของกระดองหมึกต่อการดูดซับ	65
ตารางที่ ง.2 ตารางแสดงผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับ	66
ตารางที่ ง.3 ตารางแสดงผลของอัตราการปั่นกววนต่อการดูดซับ	67
ตารางที่ ง.4 ตารางแสดงผลของเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับ	69
ตารางที่ ง.5 ตารางแสดงผลการศึกษาไอโซโทม	71
ตารางที่ ง.6 ตารางแสดงผลการศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริง	73

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckemfelder,1981)	9
รูปที่ 2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust และ Aly,1987)	10
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอร์มแบบต่างๆ (Faust และ Aly,1987)	14
รูปที่ 2.4 แสดง breakthrough curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์ (Metcalf และ Eddy,1987)	15
รูปที่ 4.1 แสดงรูปของกระดองหมีกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว	28
รูปที่ 4.2 ลักษณะของกระดองหมีกที่ผ่านการบดและแยกขนาดแล้ว	29
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีในกระดองหมีกเทียบกราฟมาตรฐาน Aragonite (CaCO <sub>3</sub> ) ด้วย X-Ray Diffraction	30
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของกระดองหมีกขนาดต่างๆ	31
รูปที่ 4.5 แสดงพื้นผิวของกระดองหมีกขนาด 35-100 เมช ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	32
รูปที่ 4.6 แสดงพื้นผิวของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	32
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม กับค่าพีเอชต่างๆของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช	33
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด กับอัตราเร็วการปั่นกวของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช	34
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม กับระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช	35
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการศึกษาไอโซเทอมของการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช	37
รูปที่ ข.1 แสดงระดับพลังงานของอะตอมโซเดียม	45
รูปที่ ข.2 แสดง Transition diagram	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.3 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	52
รูปที่ ข.4 แผนภาพเบื้องต้นของระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	55
รูปที่ ข.5 ภาพตัดขวางของคอลัมน์กล้องจุลทรรศน์แบบ SEM รุ่น 32CF ของบริษัท JEOL	56
รูปที่ ข.6 แสดงการเกิดแตรนซิชั่นของอิเล็กตรอน โดยใช้อะตอมมิก โมเดล (atomic model)(แม้น, 2535)	57
รูปที่ ข.7 แสดงระดับพลังงานของธาตุยูเรเนียมเมื่อเกิดอิเล็กตรอนแตรนซิชั่น ซึ่งแสดงเฉพาะรังสีเอกซ์ของ K และ L-series เท่านั้น (แม้น, 2535)	58
รูปที่ ข.8 ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่อง XRFs	60

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม เพื่อให้เกิดความเจริญก้าวหน้าในทุก ๆ ด้านจึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้ โดยโรงงานอุตสาหกรรมเป็นตัวอย่างหนึ่งที่ปล่อยน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาจากโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง โครเมียม โปรอท สังกะสี เป็นต้น ที่ยังคงมีแนวโน้มว่าจะก่อมลพิษทางสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยโลหะหนักเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรงในบริเวณที่ถูกปนเปื้อน และสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ทางห่วงโซ่อาหาร จากการศึกษาปริมาณของเสียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากในประเทศไทยโดยบริษัท Engineering Science ซึ่งได้คาดการณ์ไว้ใน Hazardous Waste Management Plan (พ.ศ. 2532) ว่าในปี พ.ศ. 2544 จะมีของเสียอันตรายเกิดขึ้นประมาณ 2.8 ล้านตัน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งหากไม่มีการควบคุมหรือการจัดการที่ดีแล้วสารพิษเหล่านี้จากก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ต่อไปอีกในอนาคต

วิธีการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ผลดี แต่มีข้อจำกัดคือมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำ และค่าใช้จ่ายที่สูงในการบำบัด นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน จึงมีการหาวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ซึ่งการบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการดูดซับก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเพราะมีค่าใช้จ่ายน้อย ขั้นตอนในการทำไม่ยุ่งยากและให้ผลในการบำบัดที่ดี งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเทคโนโลยีในการดูดซับที่ได้จากกระดองหมีกมาประยุกต์ใช้กับการดูดซับโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากกระดองหมีกเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย มีราคาถูก และมีความปลอดภัยในการนำมาใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับ ซึ่งจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำเอาวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากธรรมชาติมาทำการบำบัดโลหะหนัก ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำทิ้งระดับโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1.1 ปริมาณของเสียอันตรายแยกตามประเภทและปี

ประเภทของเสีย	ปริมาณของเสียอันตราย (ตัน/ปี)		
	2534	2539	2544
น้ำมัน	188,254	332,779	589,508
กากสารอินทรีย์เหลว	311	522	876
ตะกอนและของแข็งสารอินทรีย์	6,674	11,951	21,533
ตะกอนและของแข็งสารอนินทรีย์	19,163	31,850	53,696
ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก	536,322	946,565	1,658,192
ตัวทำละลาย	36,163	66,532	124,306
ของเสียเป็นกรด	31,432	53,793	96,105
ของเสียเป็นด่าง	9,839	16,846	29,019
ผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน	25	52	107
พีซีบี (PCB)	*	*	*
กากสารอินทรีย์น้ำ	242	499	1,037
น้ำเสียล้างอัดรูป	16,348	30,398	57,809
ขยะชุมชน	11,787	19,090	31,093
ขยะติดเชื้อ	76,078	123,219	200,699
รวม	932,638	1,634,104	2,813,980

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการนำวัสดุจากธรรมชาติมาดูดซับโลหะหนัก
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก คือ แคลเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำชะจากกองขยะ โดยใช้ตัวกลางในการดูดซับที่ได้จากกระดองหมึก

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีก
  - 1.1 ศึกษาขนาดของกระดองหมีกที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยแปรค่าขนาดเป็น 35-100 และ 100-200 เมช
  - 1.2 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียเป็น 3, 5 และ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 1.3 ศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยแปรค่าพีเอชเป็น 7, 8 และ 9
  - 1.4 ศึกษาอัตราเร็วในการปั่นกววนที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยแปรค่าอัตราเร็วการปั่นกววนเป็น 50, 100, 150 และ 200 rpm
  - 1.5 ศึกษาเวลาที่ที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยแปรค่าเวลาเป็น 1, 3, 5 และ 7 ชั่วโมง
2. ทำการดูดซับแคดเมียมในน้ำชะจากกองขยะ ด้วยกระดองหมีกโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาน้ำเสียสังเคราะห์

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงานโครงการพิเศษ

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูล
2. ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี
3. ทำการเตรียมวัสดุดูดซับ
4. ตัวอย่างศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)
5. ศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำชะจากกองขยะ โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีโลหะต่างชนิดกันจากแหล่งอื่นได้
2. ทราบถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุจากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณของเสียที่จะออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ( ชุตินา , 2543 )

กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้ ( ชุตินา , 2543 )

##### 1) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation )

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน กระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสภาพของต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลายโดยวิธีการเติมสารเคมี ซึ่งการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอน โลหะหนักจะมี 2 วิธีด้วยกัน คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์ ตัวอย่างการตกตะกอนทางเคมีของแคดเมียม ซึ่งทำได้โดยการเติมสารละลายที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ลงในน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียม เพื่อเกิดการตกตะกอน สารที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคดเมียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะให้ไอออนลบ คือ  $\text{OH}^-$  ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในสมการ (2.1)



##### 2) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซิน(Resin)ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และจะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้เป็น ไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคตไอออนเอ็กซ์เชนเจอร์ ( Cation Exchange ) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่าแอนไอออนเอ็กซ์เชนเจอร์ (Anion Exchange) วิธีนี้เหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดน้ำเสีย กล่าวคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นควรกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด ตัวอย่าง การแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียมโดยการกำจัดด้วยเรซิน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับไอออนของแคลเซียม โดยไอออนของเรซินที่ปล่อยออกมาจะเป็นไอออนที่ไม่มีพิษ ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) หรือโซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ (2.2)



### 3) การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ต้องทำด้วยเซลลูโลสอะซิเตท และโพลีเอมีน ซึ่งจะใช้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้น วิธีนี้ต้องใช้ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการปรับค่าพีเอชแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าและน้ำเสียจากการล้างภาพ

### 4) การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยน้ำออกนี้เป็นวิธีที่ง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศ (Atmospheric Evaporation) และการระเหยใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงๆ เท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

### 5) อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีนี้เป็น การแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้า

ที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างสูงและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

#### 6) การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

#### 7) การดูดซับ (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) พวกถ่านที่ใช้กันมี 2 ลักษณะคือ แบบคาร์บอนชนิดเม็ด (Granular Carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร และแบบคาร์บอนชนิดผง (Power Carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 200 เมช ซึ่งทำจากเมล็ดของอัลมอนต์ เปลือกถั่ว กะลามะพร้าว ไม้อื่นๆ หรือถ่านทั่วไป โดยถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้พื้นที่ผิวของคาร์บอนมาก ๆ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้มีขนาดพื้นที่ผิวดั้งแต่ 500-1500 ตารางเมตรต่อกรัม โดยถ่านกัมมันต์นี้จะมีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะได้

#### 7.1) การดูดซับ ( Adsorption )

##### 7.1.1) หลักการ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาจับและติดที่ผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ

การดูดซับที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้าไปใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงวันเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้นซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะอยู่ติดบนชั้น โมเลกุลของสารก่อนหน้า โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (Reversible) เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2 - 10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15 - 50 กิโลแคลอรีต่อโมล (Voice และ Weber, 1983)

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ, แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอควิตเวดเตตซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 - 1000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม

### 7.1.2) กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

#### 7.1.2.1) กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (Faust และ Aly, 1987) ดังนี้

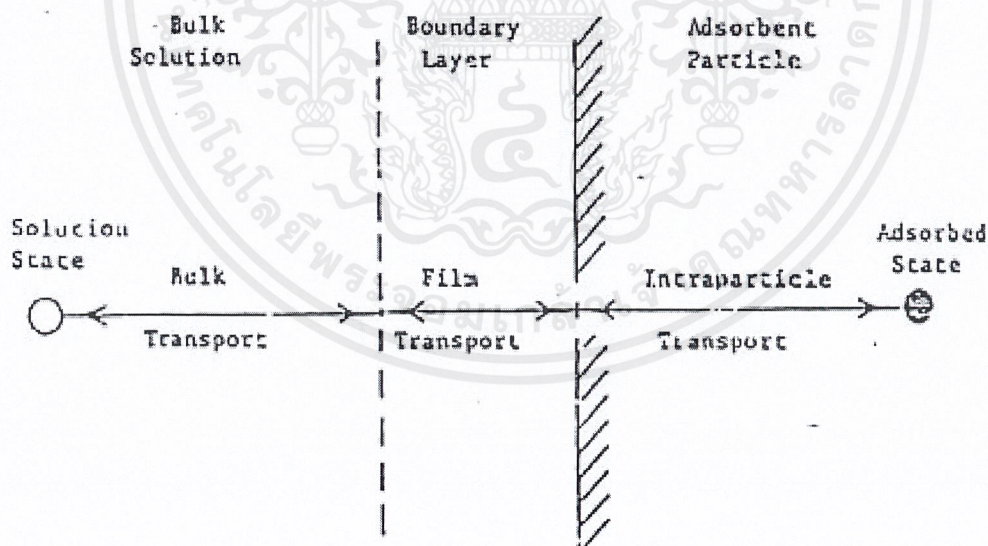
1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของสารดูดซับ
2. การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงความต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

#### 7.1.2.2) อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจึงทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากการละลายมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้น
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

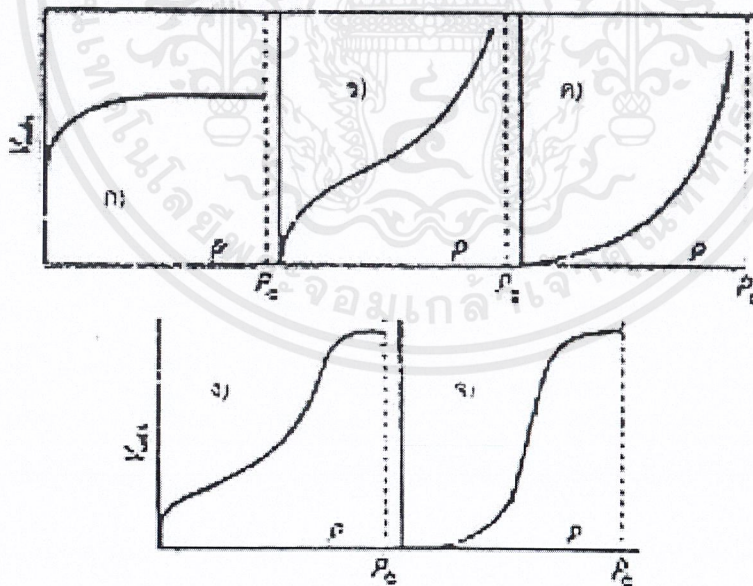
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ การขนส่งฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าภายในระบบมีสภาพปั่นป่วนเพียงพอขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 7.1.3) การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibria)

สามารถอธิบายปรากฏการณ์กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นว่า ณ จุดสมดุลของการดูดซับสมรรถนะของตัวดูดซับ (Adsorption Capacity) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวดูดซับในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ โดยเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของการดูดซับ มี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งไอโซเทอมรูป ก เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนในรูป ข ถึง จ เป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust และ Aly ,1987)

มีทฤษฎีหลากหลายที่พัฒนาขึ้นเพื่อแสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับ ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีไหนอธิบายสมการและกลไกการดูดซับได้อย่างถูกต้อง จะนำเสนอสมการทั่วไปดังนี้

#### 7.1.3.1) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) สมมติฐานพื้นฐานที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model ดังนี้

- 1) เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับได้
- 3) เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ โมเลกุล
- 4) พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Faust และ Aly, 1987) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots\dots(2.3)$$

เมื่อ

- $X$  = ปริมาณของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
- $X_m$  = ปริมาณของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์
- $C_e$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
- $b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (2.3) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{bX_m} + \frac{1}{X_m} \quad \dots\dots(2.4)$$

หรือ

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m C_m} \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_e$  ข้อมูลสมดุลการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก และเราสามารถหาค่าคงที่  $b$  และ  $X_m$  ได้จากความชันและจุดตัดกราฟ

7.1.3.2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบ บี อี ที (Brunauer-Emmett-Teller ,  
BET Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบนี้พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ใช้อธิบายการดูดซับหลายชั้น (Multilayer) โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- 2) เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบ บี อี ที (Faust และ Aly , 1987) แสดงในสมการที่ (2.6)

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e)[1 + (B - 1)(C_e - C_s)]} \quad \dots\dots(2.6)$$

เมื่อ

- $C_s$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิ  
หนึ่งๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
- $B$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (2.6) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \frac{B-1}{X_m B} \frac{C_e}{C_s} \quad \dots\dots(2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/(C_s - C_e)X$  กับ  $C_e/C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $(B-1)/(X_m B)$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_m B$  กราฟของสมการการดูดซับแบบไม่ต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 2.3 จ

### 7.1.3.3) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลวมีสมการ (2.8) (Faust และ Aly, 1987)

$$\frac{X}{M} = K C_e^{1/n} \quad \dots\dots(2.8)$$

เมื่อ

X	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม
M	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม
$C_e$	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลือ หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
K	=	ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ
1/n	=	ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับสารละลาย

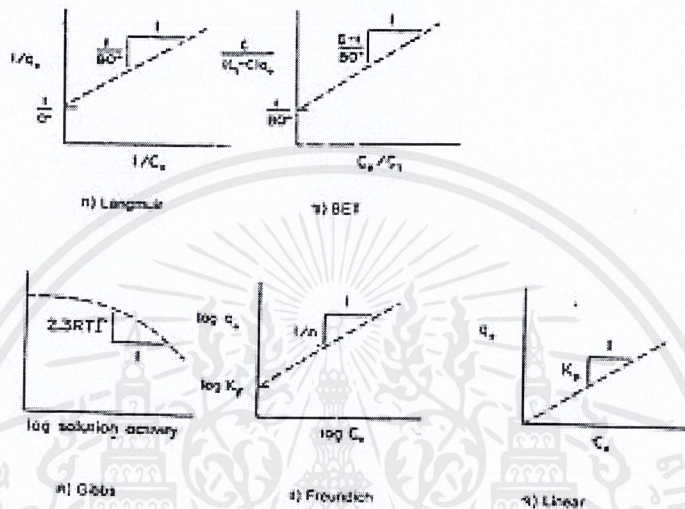
สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นตรงดังสมการ (2.9)

$$\log (X/M) = \log K + (1/n) \log C_e \quad \dots\dots(2.9)$$

พลอตกราฟระหว่าง  $\log (X/M)$  กับ  $\log C_e$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ง ค่า  $1/n$  ที่การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุในการดูดซับที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

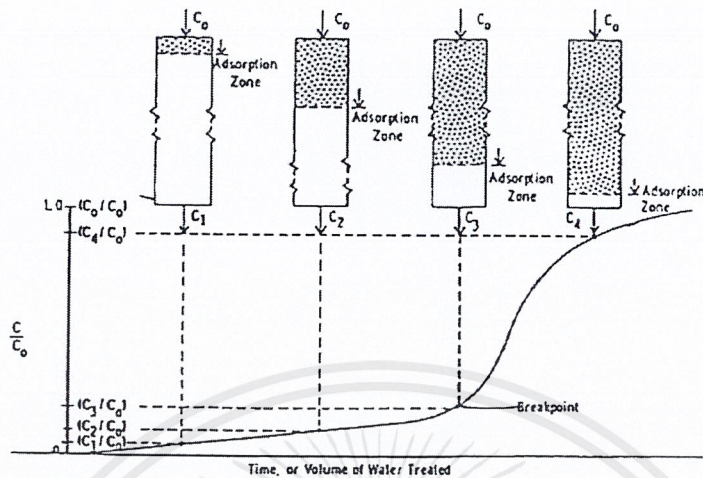
สมการ Freundlich มีประโยชน์มากที่สุดสำหรับการละลายที่เจือจาง ปกติจะใช้กับการดูดซับสิ่งเจือปนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอร์มแบบต่างๆ (Faust และ Aly, 1987)

7.1.4) ศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับและการศึกษาค่าคงที่

การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยการผ่านน้ำที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีสารปนเปื้อนเกาะที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อยๆ หมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ค่อยๆ ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ไหลผ่านการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.4 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาตรที่ใช้เรียกว่า Breakthrough Curve



รูปที่ 2.4 แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์  
(Metcalf และ Eddy, 1972)

### 7.1.5) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 7.1.5.1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางในการดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนแต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่สารภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่าการขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคในตัวควบคุมอัตราการดูดซับการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

#### 7.1.5.2) ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorption)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลงเนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการ

เคลื่อนที่ที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมอัตราการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลาย จะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 7.1.5.3) อัตราเร่งการปั่นกวน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็น ขั้นตอนที่สำคัญอัตราเร็วของสารดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกวนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมล้อมสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์ม เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นกวนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของสารดูดซับ

#### 7.1.5.4) เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช่จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริง

#### 7.1.5.5) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับเนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ในงานวิจัยนี้ตัวดูดซับคือ กระจดองหมัก

## 2.2 โลหะหนัก

โลหะ หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ทองแดง นิกเกิล เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ โลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพ คล้ายคลึงกัน ได้แก่ มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญ คือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงมาก ได้แก่ As , Au , Cd , Cu , Cr , Hg , Pb , Sb , Sn , Te และ Zn และกลุ่มโลหะที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งรองลงมา ได้แก่ Ba , Bi , Fe , Mo , Ti และ U ( Culp , 1974 )

ความเป็นพิษของโลหะเหล่านี้ เป็นผลเนื่องมาจากมนุษย์ได้รับสารเหล่านี้ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายนั่นเอง แหล่งที่มาของโลหะเหล่านี้ก็คือ จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ จากนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตรเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และมีผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

### 2.2.1 แคดเมียม (Cadmium , Cd)

#### -การค้นพบ

แคดเมียมได้รับการค้นพบเมื่อปี พ.ศ. 2360 ซึ่งในธรรมชาติมักปะปนอยู่ในแร่สังกะสี-ซัลไฟด์ และเป็นผลพลอยได้จากการถลุงสังกะสี

#### -คุณสมบัติ

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติอ่อน งามได้ มีสีขาวปนน้ำเงิน มีจุดหลอมเหลวประมาณ 321 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่ทนต่อการกัดกร่อนและระหว่างการหลอมเหลวด้วยความร้อนและความกดดันสูงทำให้เป็นไอควันในรูปของแคดเมียมออกไซด์ นอกจากนี้แล้ว แคดเมียมอาจอยู่ในรูปของเกลือหรือสารประกอบต่างๆ เช่น แคดเมียมออกไซด์ มีสีแดง

แคดเมียมซัลเฟต มีสีเหลือง ใช้ในการผลิตสี และแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม ซึ่งใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น รัศมีไอออน (pm) ของแคดเมียมเป็น 65 มีประจุเป็น 2+ และความหนาแน่นประจุเป็น  $2.11 \times 10^{10}$

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ (Dean , 1972)

Type of Industries	Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	F	Fe	Hg	Mn	Pb	Ni	Sb	Sn	Zn
Pulp,Paper, mills,Paperboard,Building , paper, Boardmills					●	●			●		●	●			●
Organic chemical, Petrochemical	●		●	●	●		●	●	●		●			●	●
Alkalis, chlorine,Inorganic chemicals	●		●	●	●		●	●	●		●			●	●
Fertilizers	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●
Petroleum refining	●		●	●	●	●	●	●			●	●			●
Basic steel work, Foundries	●		●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●
Basic non-ferrous metals-work,Foundries	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●		●		●
Motor vehicles, aircraft-plating , Finishing	●	●		●	●	●			●			●			
Flat glass, cement, asbestos products, ect.					●										
Textile mill product					●										
Leather tanning, finishing					●										
Steam generation power plants					●										

### -การใช้ประโยชน์

1. โรงงานถลุงแร่และผลิตสังกะสี
2. ผลิตแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม
3. การผลิตสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การผลิตเซมิคอนดักเตอร์
5. การผลิตพลาสติก
6. โรงงานโลหะผสม (alloy)
7. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
8. ใช้เคลือบผิวโลหะ

#### -ความเป็นพิษ

การนำแคดเมียมมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น ในอุตสาหกรรมชุบโลหะ แบตเตอรี่ เป็นต้น และอาจก่อให้เกิดมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อม

โรคพิษแคดเมียมมีการจัดบันทึกและรายงานครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2401 มีอาการแสบตา ปวดศีรษะ มึนงง บ้านหมุน คอแห้ง ไอ แน่นหน้าอก หายใจไม่สะดวก ขาไม่มีแรง มีอาการหนาวสั่น คลื่นไส้อาเจียน และปวดท้อง

โรคอิไตอิไต เกิดจากการได้รับแคดเมียมซึ่งปนมาในน้ำ ทำให้มีอาการปวดกระดูก กระดูกเปราะมาก ไตพิการ ความดันโลหิตสูง สาเหตุเกิดจากโรงงานถลุงแร่สังกะสีแห่งหนึ่งทิ้งกากโลหะซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงาน

การเข้าสู่ร่างกายและกลไกการเกิดพิษ เนื่องจากแคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้สองทาง คือทางการกินและการหายใจ เมื่อคนกินเข้าไปแคดเมียมมักถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารประมาณร้อยละ 6 แต่ในสภาวะที่ร่างกายขาดธาตุเหล็กมักทำให้เกิดการซึมเข้าสู่ร่างกายได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 20 ของจำนวนแคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกาย และส่วนทางการหายใจรับฝุ่นหรือไอควันแคดเมียมในบรรยากาศการทำงานได้ทางปอดประมาณร้อยละ 20-50 ภายหลังจากการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วแคดเมียมถูกลำเลียงต่อไปยังตับ และจับตัวกับโปรตีนประมาณร้อยละ 80-90 ของแคดเมียมทั้งหมด และประมาณร้อยละ 50 ของแคดเมียมที่มีอยู่ทั้งหมดในร่างกายสะสมอยู่ในตับและไต แคดเมียมมีระยะครึ่งอายุยาวถึงประมาณ 7 - 30 ปี ตามปกติแคดเมียมถูกขับออกทางปัสสาวะก่อนในรูปของสารเชิงซ้อนแคดเมียม-เมทัลโลธิโอไนน์ อัตราการขับออกทางปัสสาวะค่อนข้างต่ำ และจำนวนเล็กน้อยถูกขับออกทางน้ำดี น้ำลาย ผม และเล็บ

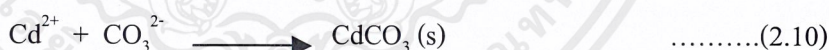
พิษเรื้อรังจากแคดเมียมอาจเป็นพิษเฉพาะที่ ได้แก่ ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจการทำลาย การมีโปรตีนในปัสสาวะ และเกิดโรคโลหิตจาง เป็นต้น

การได้รับแคดเมียมเป็นระยะเวลานาน มักพบลักษณะของกระดูกผิดปกติ ได้แก่ กระดูกโพรง กระดูกพรุน และกระดูกหักง่าย ทำให้ผู้ป่วยมีอาการปวดกระดูกขา และเดินลำบาก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นผลของแคดเมียมต่อเมตาโบลิซึมของกระดูกโดยตรง และแคดเมียมยังก่อให้เกิดการแตกทำลายของเม็ดเลือดแดงเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการขาดธาตุเหล็กทำให้เกิดอาการซีดชนิดซึ่งพบบ่อยในผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าไปในระดับสูง

แคดเมียมได้รับการจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง เมื่อได้รับแคดเมียมทำให้เกิดมะเร็งในต่อมลูกหมากเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาหลายฉบับที่แสดงถึงแนวโน้มว่าแคดเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง โดยมีการทดลองให้ CdS และ CdSO<sub>4</sub> ใต้ผิวหนังและกล้ามเนื้อสัตว์ทดลองพบว่าก่อให้เกิดมะเร็งบริเวณเนื้อเยื่อติดต่อ (sarcoma) และสามารถแพร่ไปยังต่อมน้ำเหลืองและปอดได้

### 2.3 กระดองหมีก (Cuttle bone)

กระดองหมีก คือ ส่วนหนึ่งของหมีกกระดอง (Cuttlefish) มีลักษณะเหมือนกระดูก แต่ที่จริงแล้วเป็นเปลือกที่อยู่ภายในตัวของหมีกกระดอง มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถใช้เป็นสารตกตะกอนในการบำบัดโลหะหนักได้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) สามารถจับกับโลหะหนักในรูปโลหะคาร์บอเนตได้อย่างแข็งแรงและเกิดเป็นสารประกอบ แสดงดังสมการที่ 2.10 และ 2.11



## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Bassi , Prasher and Simpson (2000) ได้ศึกษาการใช้เกร็ดโคโตซานในการกำจัดโลหะไอออนออกจากสารละลาย โลหะหนักที่นำมาศึกษา ได้แก่ สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณของตัวดูดซับ จากผลการศึกษาพบว่า เกล็ดโคโตซานมีความสามารถที่จะทำการดูดซับไอออนของทองแดงได้มากที่สุด และมีความสามารถที่จะทำการดูดซับไอออนของตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ได้ลดลงตามลำดับ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับมีค่าเท่ากับ 6 และ 7 การดูดซับโลหะหนักจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงจะดูดซับได้น้อยลงจนมีค่าคงที่ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น โดยการเขย่าเพื่อให้เกล็ดโคโตซานและสารละลายโลหะหนักผสมกันไม่ได้มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนักของโคโตซาน

2. S.E. Kuh และ D.S. Kim (2000) ได้นำเปลือกไข่มาทำการดูดซับแคดเมียมโดยศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน ขนาดของเปลือกไข่ อุณหภูมิ และพีเอช จากผลการศึกษาพบว่า การดูดซับแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวดูดซับ อุณหภูมิและพีเอช แต่เมื่อเปลือกไข่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะดูดซับโลหะหนักได้น้อยลง

3. H.K.An , B.Y.Park และ D.S. Kim (2001) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้กระดองปูเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น ได้แก่ cation exchange resin , zeolite , granular activated carbon และ power activated carbon โลหะหนักที่นำมาทำการศึกษา ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และโครเมียม ซึ่งกระดองปูมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด สำหรับตัวดูดซับชนิดอื่นสามารถกำจัดโลหะหนักโดยเรียงลำดับตามนี้ cation exchange resin , zeolite , power activated carbon และ granular activated carbon การกำจัดโลหะหนักด้วยเปลือกปูนั้น แคดเมียมสามารถถูกกำจัดไปได้มากที่สุด และสามารถกำจัดตะกั่ว โครเมียม และทองแดง ได้ตามลำดับ

4. ประสิทธิ์ และ อรไท (1999) ได้ศึกษาการแยกตะกั่วออกจากแหล่งน้ำโดยใช้เปลือกไข่และเกร็ดปลาเป็นตัวดูดซับ โดยทำการศึกษาผลของพีเอช เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของตะกั่ว และเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่วไอออนกับการดูดซับโลหะไอออนชนิดอื่น จากผลการศึกษาพบว่า พีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วของเปลือกไข่และเกร็ดปลาคือ 4.5 เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับ 80 นาที ส่วนที่ความเข้มข้นตะกั่วต่าง ๆ กันนั้น เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะดูดซับตะกั่วได้ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับตะกั่วกับไอออนชนิดอื่นคือ นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม พบว่าทั้งเปลือกไข่และเกร็ดปลาสามารถดูดซับโครเมียมได้ดีที่สุด และดูดซับตะกั่วได้น้อยที่สุด

5. ชีวรัตน์ และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยแครง โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ซึ่งตัวดูดซับที่นำมาทดสอบนั้นมีความแตกต่างกันของขนาดและสารที่ใช้กระตุ้น โดยใช้เปลือกหอยแครงที่มีขนาด 8-16 เมช และ 16-100 เมช กระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชู และกรดเกลือ พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 16-100 เมช ที่กระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชูมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 115.82 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเปลือกหอยแครง และในการทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์โดยใช้น้ำทิ้งที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากห้องปฏิบัติการเคมี ซึ่งมีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลของการบำบัดน้ำทิ้งที่มีตะกั่วปนเปื้อนได้ 522 เท่า ของปริมาตรบรรจุคอลัมน์ โดยน้ำที่บำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

6. ชุตินา และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำชะจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตซาน โดยทำการศึกษาที่สภาวะเหมาะสมในการกำจัดทองแดงและแคดเมียม ซึ่งได้แก่ สภาวะพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณของไคโตซานที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการสัมผัส สภาวะที่ทำการเขย่าสารละลายและไม่เขย่าสารละลาย จำนวนรอบในการเติมไคโตซาน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุดนั้นจะได้อ่า พีเอชที่เหมาะสม คือ 8 ปริมาณไคโตซานที่ใช้เท่ากับ 0.48 กรัม และเวลาที่ใช้ในการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่อเขย่าดีกว่าไม่เขย่า และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการเติมไคโตซานเป็น 4 รอบ

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมี

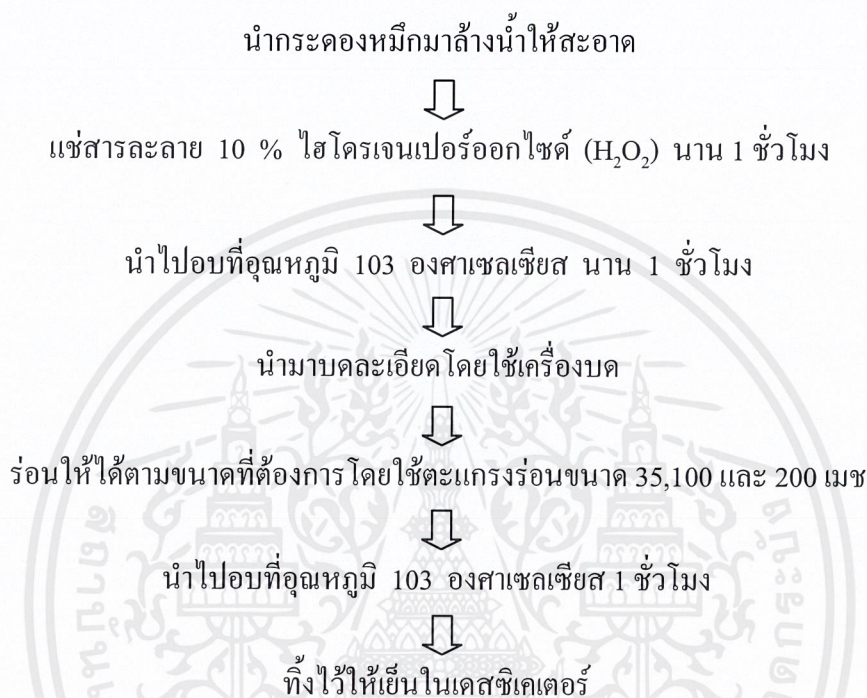
1. กระจกหมีกใช้เป็นตัวดูดซับ
2. สารละลายสต็อกแคดเมียมเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (Stock Solution Cadmium) บริษัท Carlo Ergen
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide , NaOH) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen
4. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid ,HCl) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen
5. กรดไนตริก (Nitric acid , HNO<sub>3</sub>) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ Hydrogen eroxide , H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เกรการค้า บริษัท Carlo Ergen
7. น้ำชะจากกองขยะจากโรงกำจัดขยะอ่อนนุช กรุงเทพฯ

##### 3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer AA-680 ยี่ห้อ Shimadzu
2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น MSBO20 CX1.5 ยี่ห้อ SUNYO
3. เครื่องเขย่าสาร (Shaker) รุ่น Hetofrig CB60 VS ยี่ห้อ Heto
4. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) รุ่น 251 Denver Instrument Company
5. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด รุ่น TC - 254 Denver Instrument Company
6. ตู้อบ (Oven) รุ่น DIN 40050- IP20 ยี่ห้อ Schutzart
7. เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น B- 169 Vacuum System B'U'CHI Swizerland
8. เครื่องบดตัวอย่าง
9. ชุดเครื่องร่อนโดยใช้ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 35-100 และ 100-200 เมช
10. เครื่องแก้วต่างๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
11. เสซซิเคเตอร์

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากกระดองหมีก



#### 3.2.2 ศึกษาผลของขนาดกระดองหมีกต่อการดูดซับ

ชั่งกระดองหมีกที่ได้จากข้อ 3.2.1 ขนาด 35-100 และ 100-200 เมช มาจำนวนละ 0.2 g

↓

เติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 4 mg/l ปรับพีเอชเป็น 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์

↓

นำไปเขย่าที่อัตราเร็ว 150 rpm นานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

↓

นำไปปั่นเหวี่ยงที่มีความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกน้ำใสส่วนบนออก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำน้ำใส่ส่วนบนไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วย AAS  
 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของกระดองหมีกเพื่อเลือกขนาดที่เหมาะสม  
 ↓  
 ไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.3 ศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ

นำกระดองหมีกที่เตรียมไว้ขนาดที่ได้จากข้อ 3.2.2 มาจำนวนละ 0.2 g  
 ↓  
 เติมนลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 4 mg/l และมีค่าพีเอชเป็น 7,8 และ 9  
 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 ↓  
 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm นานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง  
 ↓  
 นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อแยกน้ำใส่ส่วนบนออก  
 ↓  
 นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วย AAS  
 ↓  
 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกค่าพีเอชเหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.4 ศึกษาผลของอัตราเร็วการปั่นกวบนต่อการดูดซับ

นำกระดองหมีกที่เตรียมไว้ขนาดที่ได้จากข้อ 3.2.2 มาจำนวนละ 0.2 g  
 ↓  
 เติมนลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 4 mg/l และมีค่าพีเอชเป็น 7  
 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 ↓  
 นำไปเขย่าที่อัตราเร็ว 50,100,150 และ 200 rpm นานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง  
 ↓  
 นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อแยกน้ำใส่ส่วนบนออก  
 ↓



นำส่วนในไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วย AAS  
เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกอัตราเร็วที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.5 ศึกษาเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

นำกระดองหมีกที่เตรียมไว้ขนาดที่ได้จากข้อ 3.2.2 มาจำนวนละ 0.2 g



เติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 4 mg/l และมีค่าพีเอชเป็น 7  
โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์



นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 rpm นานเป็นเวลา 1,3,5 และ 7 ชั่วโมง



นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อแยกน้ำในส่วนบนออก



นำส่วนในไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วย AAS



เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกเวลาที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.6 การศึกษาค่าไอโซเทอร์มของการดูดซับ

นำกระดองหมีกที่ได้จากข้อ 3.2.2 มาจำนวนละ 0.2 g



เติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 0,3,5 และ 7 mg/l  
และมีค่าพีเอชเป็น 7 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์



นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 rpm นานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อแยกน้ำใสส่วนบนออก



นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วย AAS

### 3.2.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำชะจากกองขยะ

นำกระดองหมีกที่ได้จากข้อ 3.2.3 มาจำนวนละ 0.2 g



เติมลงในน้ำชะจากกองขยะ



นำไปเขย่าที่ความเร็ว rpm นานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อแยกน้ำใสส่วนบนออก



นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วย AAS

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

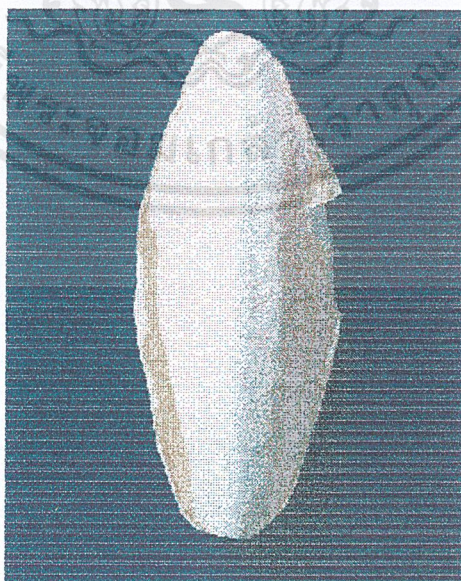
จากการทดลองการใช้กระดองหมีก ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำชะขยะที่ปนเปื้อนของแคดเมียมจากโรงกำจัดขยะอ่อนนุชได้ผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของกระดองหมีก

##### 4.1.1 ศึกษาองค์ประกอบของกระดองหมีก

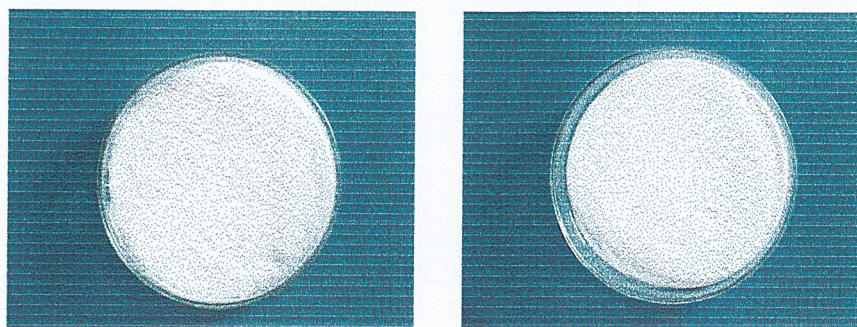
กระดองหมีกมีลักษณะดังรูป 4.1 เมื่อนำมาแช่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 % เพื่อทำความสะอาด ทำให้แห้ง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด แล้วนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 35-100 เมช และ 100-200 เมช ดังรูป 4.2 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction และ X-Ray Fluorescence

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระดองหมีกด้วย X-Ray Fluorescence พบว่าในกระดองหมีกมีสารประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า CaO เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกระดองหมีก



รูปที่ 4.1 แสดงรูปของกระดองหมีกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขนาด 35-100 เมช

ขนาด 100-200 เมช

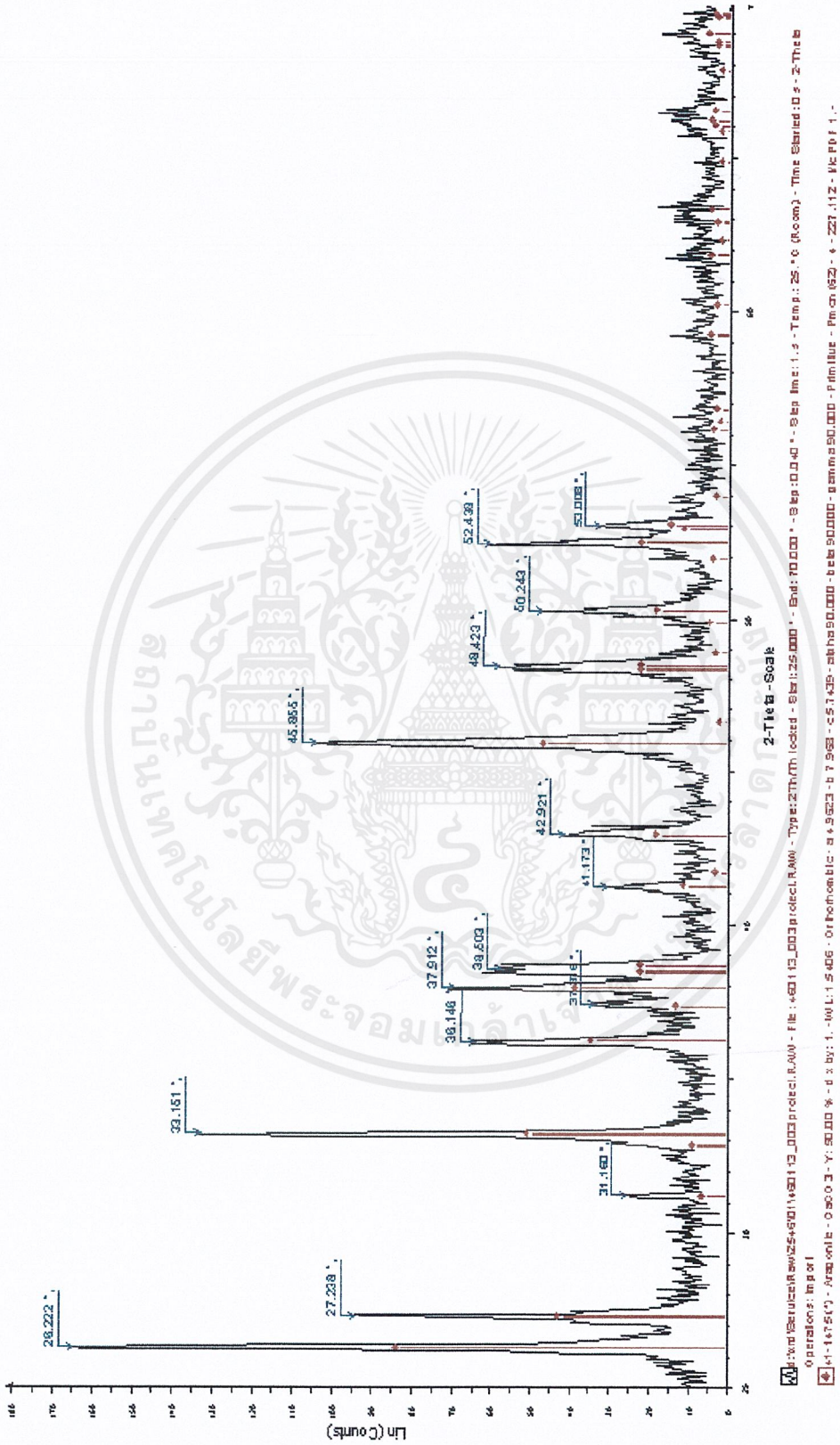
รูปที่ 4.2 ลักษณะของกระดองหมีกที่ผ่านการบดและแยกขนาดแล้ว

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของหมีกกระดองเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ
Na <sub>2</sub> O	1.8200
MgO	0.1870
SiO <sub>2</sub>	0.0456
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1440
SO <sub>3</sub>	0.3930
Cl	1.0600
K <sub>2</sub> O	0.1500
CaO	94.9000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1780
CuO	0.0501
SrO	0.879
ZrO <sub>2</sub>	0.0303
WO <sub>3</sub>	0.0928

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าองค์ประกอบหลักของกระดองหมีก คือ Aragonite (CaCO<sub>3</sub>) ดังรูป 4.3

# cuttlebone



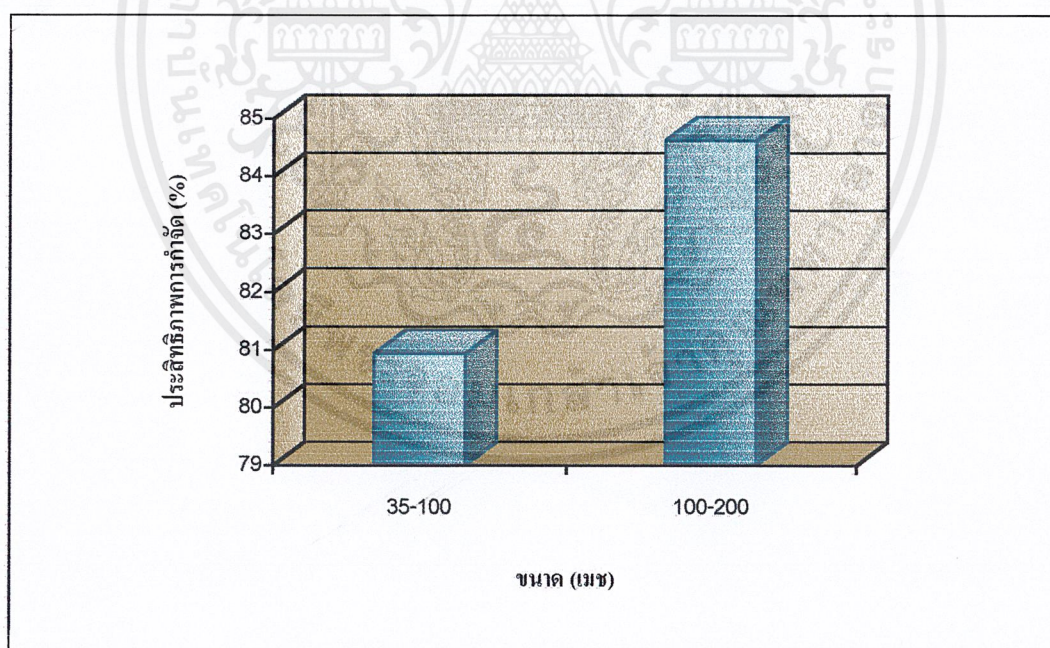
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในกระดูกหมีเทียบกราฟมาตรฐาน Aragonite (CaCO<sub>3</sub>) ด้วย X-Ray Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

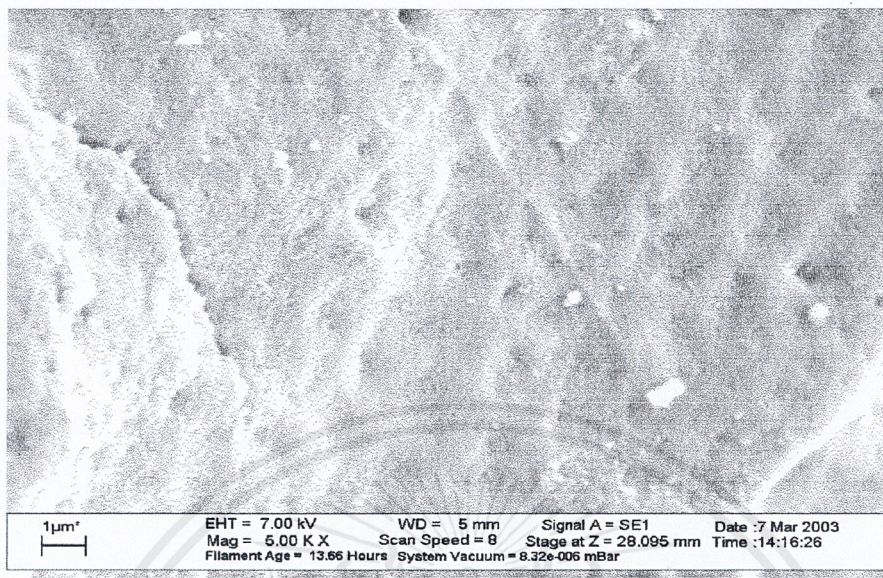
จากรูปที่ 4.3 พีคส์แดงแสดงพีคของกราฟมาตรฐาน Aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) และพีคสีดำแสดงพีคของกระดูกหมีก (Cuttle bone) พบว่าพีคของกระดูกหมีกจะซ้อนทับกับพีคของ Aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) แสดงว่ากระดูกหมีกมีสารจำพวก Aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก

#### 4.2 ผลของขนาดของกระดูกหมีกต่อการดูดซับ

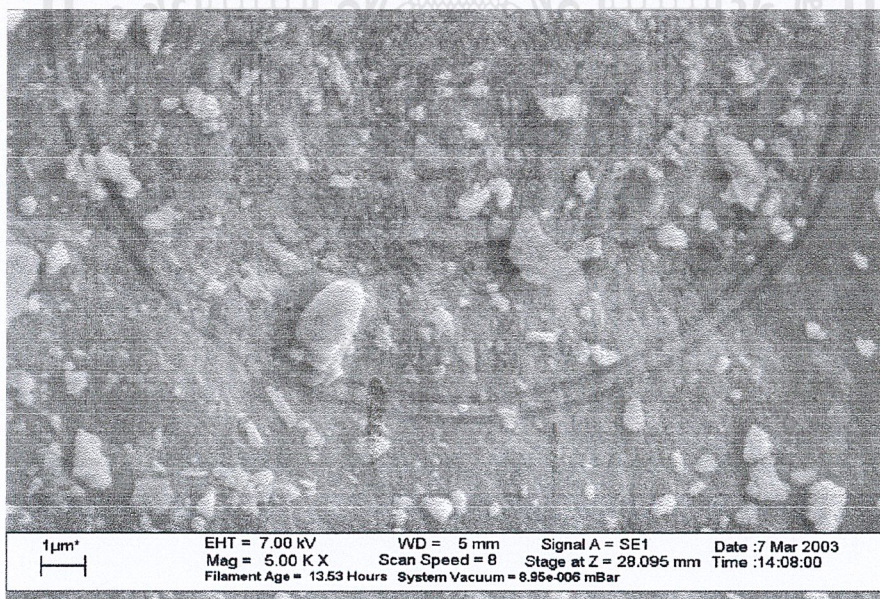
จากการศึกษาขนาดของกระดูกหมีกมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบขนาดของกระดูกหมีก 35-100 และ 100-200 เมช ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กระดูกหมีกขนาด 35-100 และ 100-200 เมช มีค่าเป็นร้อยละ 80.93 และ 84.62 พบว่ากระดูกหมีกที่มีขนาด 100-200 เมช (ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า) มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้สูงกว่ากระดูกหมีกที่มีขนาด 35-100 เมช ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ จากผลการทดลองจึงเลือกกระดูกหมีกขนาด 100-200 เมช เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของกระดูกหมีกขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.5 แสดงพื้นผิวของกระดองหมีกขนาด 35-100 ไมครอน  
ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

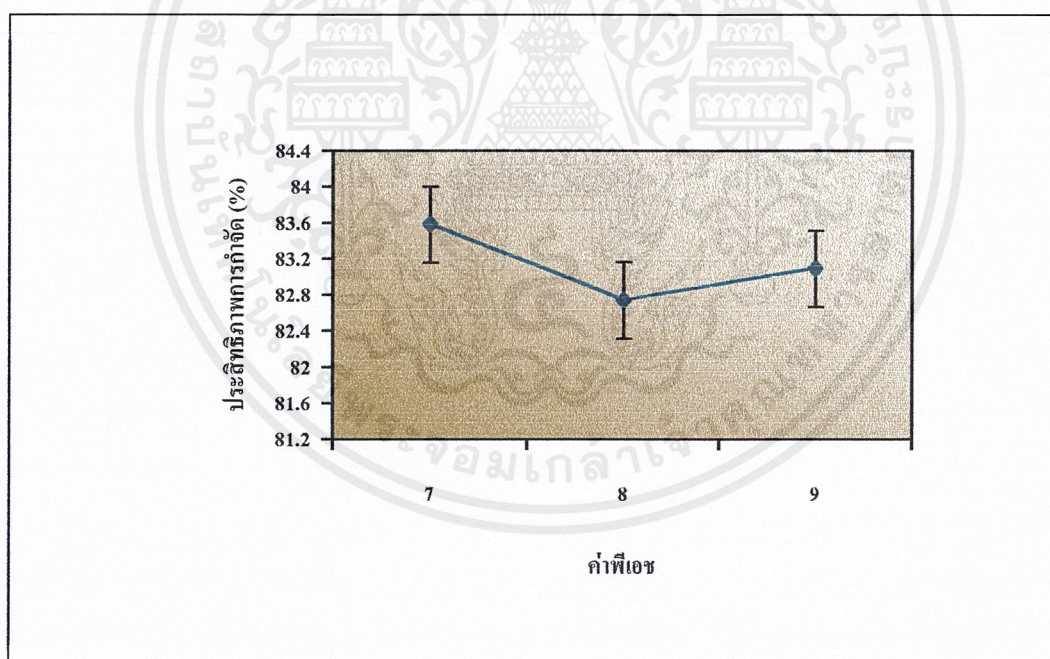


รูปที่ 4.6 แสดงพื้นผิวของกระดองหมีกขนาด 100-200 ไมครอน  
ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 ผลของพีเอชต่อการดูดซับ

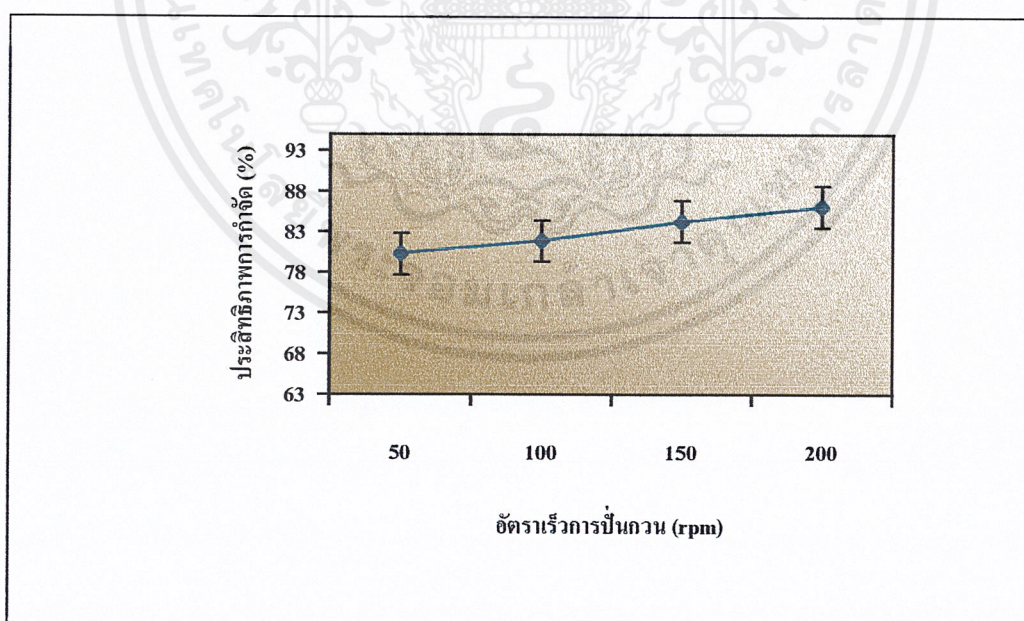
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์ โดยทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียดังเคราะห์เป็น 7, 8 และ 9 การทดลองนี้ไม่ศึกษาที่พีเอชเป็นกรด เนื่องจากกระดองหมีกซึ่งมี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบหลักจะละลายในสารละลายกรด ทำให้สูญเสียตัวดูดซับที่ใช้ไป ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 7, 8 และ 9 มีค่าเป็นร้อยละ 83.58, 82.58, 83.09 ตามลำดับ ซึ่งที่ค่าพีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด รองลงมาคือ พีเอช 9 และ 8 จากรูปที่ 4.7 ค่าพีเอช 9 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้นจาก ค่าพีเอช 8 เนื่องจากที่ค่าพีเอช 9 ไอออนที่อยู่ในรูปสารละลายจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นตะกอนที่อยู่ในรูป  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  จากผลการทดลองทำให้เลือกค่าพีเอช 7 ไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม กับค่าพีเอชต่าง ๆ ของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช

#### 4.4 ผลของอัตราเร็วการปั่นกวนต่อการดูดซับ

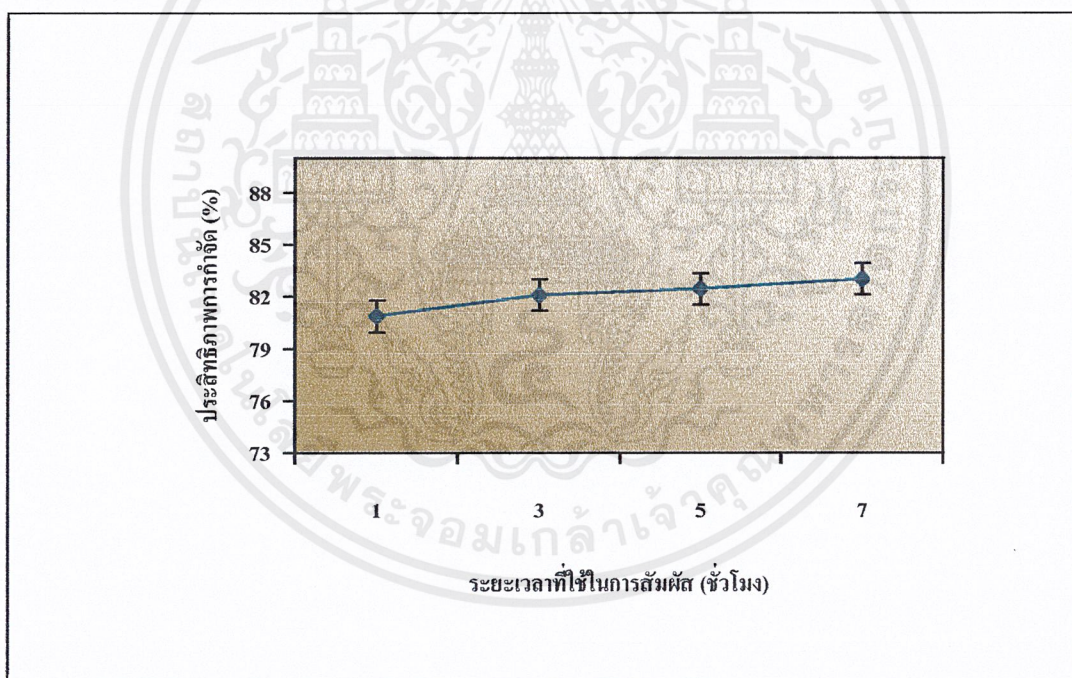
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์ (รูปที่ 4.8) โดยทำการแปรค่าอัตราเร็วการปั่นกวนเป็น 50, 100, 150 และ 200 rpm พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเป็นร้อยละ 80.29, 81.89, 84.27 และ 86.09 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วที่ใช้ในการปั่นกวน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดความเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการปั่นกวน ถ้ามีการปั่นกวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารละลายจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้านำมีการปั่นกวนสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลงทำให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ที่อัตรา การปั่นกวน 200 rpm มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงที่สุด แต่จากการทดลองเลือกอัตราเร็วการปั่นกวน 150 rpm ไปใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไม่แตกต่างกันมากนัก และการปั่นกวนในอัตราเร็วสูงจะทำให้สารกระเด็นออกจากอุปกรณ์ที่บรรจุขณะทำการทดลอง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด กับอัตราเร็วการปั่นกวนของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช

#### 4.5 ผลของเวลาในการสัมผัส

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการแปรค่าระยะเวลาในการสัมผัสเป็น 1, 3, 5 และ 7 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาในการสัมผัสเป็น 1, 3, 5 และ 7 ชั่วโมง เป็นร้อยละ 80.87, 82.10, 82.45 และ 83.02 ตามลำดับ นั่นคือประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัส อย่างไรก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดที่เวลาต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงเลือกระยะเวลาในการสัมผัสที่ 1 ชั่วโมง นำไปใช้ในการทดลองต่อไป เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการทดลอง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม กับระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช

#### 4.6 ผลการศึกษาของไอโซเทอม

จากผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีกขนาด 100-200 เมช ที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยทำการปั่นกวนที่อัตราเร็ว 150 rpm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปรับค่าพีเอชเป็น 7 ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการศึกษาไอโซเทอม

ความเข้มข้นเดิม (mg / L)	ความเข้มข้นของ แคดเมียมที่เหลือ หรือ ค่า C (mg/L)	log C	ค่า X/M (mg/g)	log (X/M)	% Removal
3	0.464	-0.333	1.265	-0.102	88.40
5	0.910	-0.040	2.045	0.311	77.85
7	1.341	0.127	2.830	0.450	66.48
9	1.882	0.275	3.580	0.554	74.28

จากการศึกษาโดยทำการแปรค่าความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 3, 5, และ 7 mg/L พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ผลเป็นร้อยละ 88.40, 77.25 และ 66.48 ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถคำนวณหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich จากสูตร  $\log (X/M) = 1/n \log C_c + \log K$

เมื่อ

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

$C_c$  = ความเข้มข้นสมดุลของตัวดูดซับที่เหลือ (mg/L)

K = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

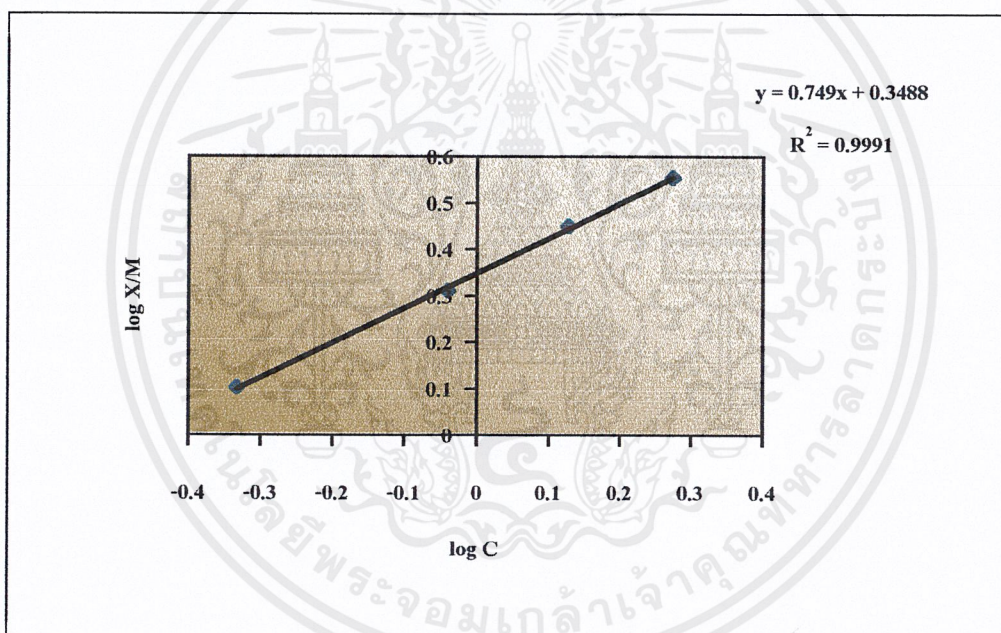
1/n = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

(Concentration Dependence)

นำค่า  $\log C$  กับ  $\log (X/M)$  มาพล็อตกราฟจะได้สมการเส้นตรง (รูปที่ 4.10) ดังนี้

$$\log (X/M) = 0.749 \log C + 0.3488$$

โดยที่จากสมการดังกล่าวจะได้ค่า  $1/n$  และค่า  $k$  เป็น 0.749 และ 2.232 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณกระดองหมึกที่จะใช้ในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริงได้ และจากค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9991 สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของกระดองหมึกนั้น จะเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของ Freundlich ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการศึกษาไอโซเทอมของการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ของกระดองหมึกขนาด 100-200 เมช

#### 4.7 ผลการศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำชะจากกองขยะ

จากการทดลองโดยใช้กระดองหมีกขนาด 100-200 เมช จำนวน 0.2 กรัม มาดูดซับน้ำชะจากกองขยะที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 1.336 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจริงเป็น 7 ใช้อัตราเร็วการปั่นกววน 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลองจริงพบว่า กระดองหมีกมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้เป็น 0.985 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเป็นร้อยละ 74.28 แต่จากการคำนวณโดยใช้สมการไอโซเทอมของ Freundlich พบว่ากระดองหมีกควรจะมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมเท่ากับ 1.995 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 85.40

ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากในน้ำเสียจริงอาจมีไอออนชนิดอื่นปนอยู่ ซึ่งอาจรบกวนการดูดซับแคดเมียม ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของกระดองหมีกลดลง

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาคุณสมบัติของกระดองหมีกและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 คุณสมบัติของกระดองหมีก

จากการศึกษาคุณสมบัติของกระดองหมีกที่ผ่านการทำความสะอาดและคัดขนาด พบว่ากระดองหมีกมีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก

#### 5.2 สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมของกระดองหมีก

1. การศึกษาผลของขนาดของกระดองหมีกต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ในสภาวะการทดลองคือ ค่าพีเอช 7 อัตราการปั่นกววน 150 รอบ/นาท เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่ากระดองหมีกขนาด 100-200 เมช มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมถึงร้อยละ 84.62
2. การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช พบว่าที่ค่าพีเอช 7 กระดองหมีกสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมถึงร้อยละ 83.58
3. การศึกษาอัตราเร็วการปั่นกววนด้วยกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช ที่ค่าพีเอช 7 พบว่าที่อัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 150 และ 200 รอบ/นาท จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นร้อยละ 84.27 และ 86.09 ตามลำดับ แต่เลือกอัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 150 รอบ/นาท เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไม่แตกต่างกันมากนักและน้ำเสียก็ไม่กระเด็นออกจากอุปกรณ์ที่บรรจุ
4. การศึกษาเวลาที่ที่เหมาะสมในการปั่นกววนของกระดองหมีกขนาด 100-200 เมช ที่ค่าพีเอช 7 อัตราเร็วการปั่นกววน 150 รอบ/นาท พบว่าที่เวลา 1, 3, 5 และ 7 ชั่วโมงที่ทำการทดลอง มีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมที่ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาในการปั่นกววนที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุด เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการทดลอง

5. การศึกษาผลของไอโซเทอมพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของกระดองหมีกเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของ Freundlich ซึ่งได้ค่าคงที่  $1/n$  และค่า  $k$  เท่ากับ 0.7516 และ 2.235 ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของกระดองหมีกในน้ำเสียจริงจะลดลงเนื่องจากอาจมีการรบกวนจากไอออนของสารอื่น ๆ อย่างไรก็ตามกระดองหมีกสามารถที่จะกำจัดแคดเมียมได้ และเป็นวิธีที่มีต้นทุนถูก ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งถ้ามีการพัฒนาตัวดูดซับหรือวิธีในการดูดซับ และนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง จะเป็นวิธีบำบัดน้ำเสียที่มีราคาถูกลงและยังเป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการลดของเสียสู่สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาถึงประสิทธิภาพการดูดซับของกระดองหมีกในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่น
2. ควรศึกษาถึงแนวทางในการกำจัดกระดองหมีกที่ผ่านการดูดซับแคดเมียม
3. ควรศึกษาถึงแนวทางในการนำโลหะหนักที่ถูกดูดซับในกระดองหมีกนั้นมาใช้ประโยชน์ใหม่
4. ควรทำการศึกษา Cation Exchange Capacity เพื่อเป็นการยืนยันว่าแคดเมียมถูกดูดซับอยู่ในรูปแคดเมียมคาร์บอเนต

## บรรณานุกรม

- ชุติมา สันท์ศักดิ์ และคณะ. 2544. การดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตซาน. กรุงเทพฯ : โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชุติมา เสพย์ธรรม. 2543. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยถ่านลอยที่ผ่านการปรับปรุง. กรุงเทพฯ : วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์ และคณะ. 2544. การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง. กรุงเทพฯ : โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ชวนชม
- วิลาวัลย์ จีประเสริฐ. 2542. อาชีวเวชศาสตร์ ฉบับพิเศษวิทยา. โครงการตำรา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. นนทบุรี.
- APHA , AWWA and WPCF. 1995. **Standard Methods for the Examination of water and wastewater.** 19<sup>th</sup> ed.
- Culp , G.L and Culp , R.L. 1974. **New Concepts in water Purification** pp. 105-114.
- Dean, J. G., Bosqui , F. L. and Lanouette , K.H. 1972. **Removing Heavy Metals from wastewater.** Environ. Sci. technol. 6 pp. 518-521.
- Eckenfelder , W.W. 1981. **Application of adsorption to Wastewater Treatment** , Boston, Butterworth .
- Faust , S.D. and Aly , OM. 1987. **Adsorption Process for Water Treatment** , Stoneham, Butterworth .
- Matcalf and Eddy boston .1972. **Wastwwater Engineering.** McGraw – Hill , New York .
- S.E.KUH and D.S. KIM. 2000. **Removal characteristics of cadmium ion by waste egg shell.** Environ.tech. 21 pp. 883-890.
- Suzuki , M. 1990. **Adsorption Engineering.** Tokyo , Elsevier .

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารเคมี

#### 1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมและน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม

##### 1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 50 mg/L

1. ปิ่ตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม  
 จากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 1000 mg/L จำนวน 5 ml  
 ↓  
 ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml  
 ↓  
 เจือจางด้วยกรดไนตริก 1:1 จนถึงขีดวัดปริมาตร

##### 1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1,3,5,8 และ 10 mg/L

1. ปิ่ตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม  
 จากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 50 mg/L จำนวน 1,3,5,8 และ 10 ml  
 ↓  
 ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml  
 ↓  
 เจือจางด้วยกรดไนตริก 1:1 จนถึงขีดวัดปริมาตร

### 1.3 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 3,4,5 และ 7 mg/L

ปีเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมจากสารละลายมาตรฐาน  
แคดเมียมเข้มข้น 50 mg/L จำนวน 6,8,510 และ 14 ml



ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml



เจือจางด้วยกรดไนตริก 1:1 จนถึงขีดวัดปริมาตร



## ภาคผนวก ข.

### อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

#### (Atomic Absorption Spectroscopy , AAS)

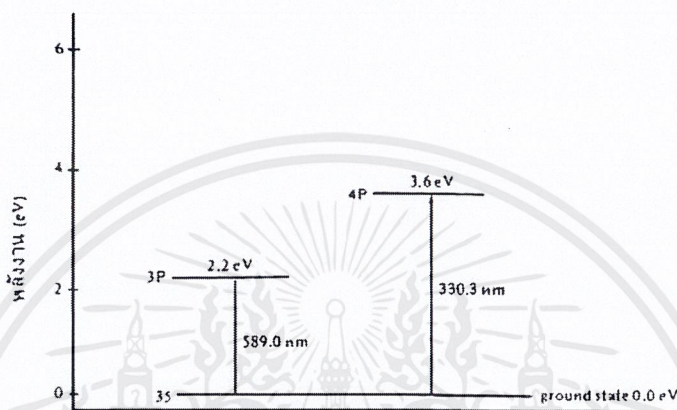
เทคนิคทาง AAS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยง ความแม่นยำ และมีสภาพไวสูง เป็นเทคนิคที่เฉพาะดีมาก ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ก็ไม่สูงมากนัก ดังนั้นห้องปฏิบัติการที่ทันสมัย โดยทั่วไปจะมีเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีอยู่ด้วยเสมอ ความสามารถของเทคนิคนี้สูงมาก เพราะสามารถวิเคราะห์ต่างๆ ได้ถึง 64 ธาตุ ซึ่งนับว่ามากพอสมควร สำหรับเครื่องมือเพียงอย่างเดียว ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ (แมน และ อมร, 2534)

ปี ค.ศ. 1953 Walsh ได้สร้างความสนใจและแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และข้อดีต่างๆ ของการใช้อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีเพื่อการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งในขณะนั้นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทางสเปกโทรสโกปี ได้แก่ เทคนิคคัลเลอร์ิเมตรี (colorimetry) และเทคนิคทางอะตอมมิกอิมิสชันสเปกโทรสโกปี (atomic emission Spectroscopy) และในปี ค.ศ. 1955 Walsh ได้พัฒนาเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (atomic absorption Spectroscopy) ขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้อย่างกว้างขวาง ช่วยทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น และได้เปรียบกว่าการใช้วิธีทางอะตอมมิกอิมิสชัน ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้อยู่มาก

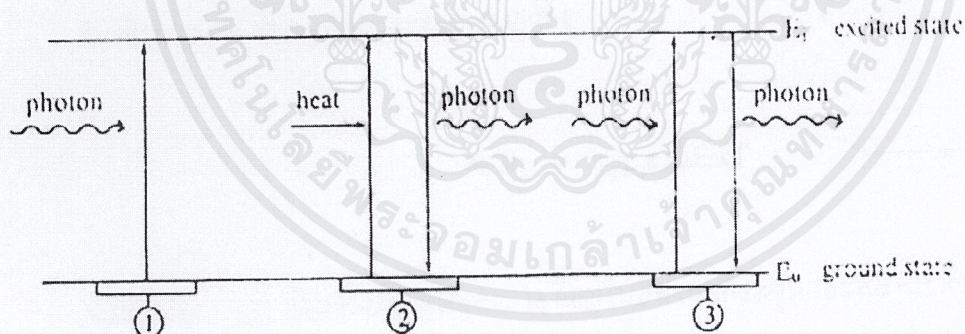
#### 1. หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Principles of Atomic Absorption)

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นอันหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน เช่น อะตอมของโซเดียมจะดูดกลืนได้ดีที่มีความยาวคลื่น 589 nm เพราะแสงที่มีความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสถานะกระตุ้น ดังรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่นเหล่านี้จะเป็น spectroscopicline ของอะตอมมิกสเปกตรัม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่นพลังงานความร้อนจากเปลวไฟหรือ

ความร้อนจากไฟฟ้าเป็นต้น ความร้อนจะทำให้เกิดพลังงานแตกตัว (dissociation) หรือเปลี่ยนเป็นไอ (vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้



รูปที่ ข.1 ระดับพลังงานของอะตอมโซเดียม ( ${}_{11}\text{Na}^{23}$ ) ( $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$ )



รูปที่ ข.2 แสดง Transition diagram สำหรับ

1. อะตอมมิกแอบซอร์พชั่น
2. อะตอมมิกอิมิสชั่น
3. อะตอมมิกฟลูออเรสเซนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดอะตอมมิกแอบซอร์พชัน อะตอมมิกอิมิสชันและอะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์นั้น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นการเกิดแทรนซิชันจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก (first excited state) มีด้วยกัน 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก โดยการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนเป็นอะตอมมิกแอบซอร์พชัน

แบบที่ 2 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากความร้อน ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะไปยังพลังงานกระตุ้นระดับแรกแล้วปล่อยพลังงานออกมา เมื่อกลับเข้าสู่สถานะพื้นจะให้โฟตอนออกมาแล้วเรียกว่า อะตอมมิกอิมิสชัน

แบบที่ 3 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากโฟตอนที่มาจากสเปคตรัมทำให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะกระตุ้น เมื่อกลับเข้าสู่สถานะพื้นจะให้โฟตอนออกมา เรียกว่าเป็นการเกิดอะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์

จากกระบวนการที่สารประกอบแตกตัวเป็นอะตอมแล้วกลายเป็นไอ หรือเกิดการกระตุ้นหรือแม้แต่เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนด้วยพลังงานความร้อนเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของ Thermalequilibrium จำนวนอะตอมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น ( $N_j$ ) ที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคกับจำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้นต่อหน่วยปริมาตร ( $N_0$ ) ดังนั้น  $N_0$  ก็จะเกิดปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย Boltzmann ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ  $N_j$  กับ  $N_0$  ดังแสดงในสมการที่ (ข-1)

$$N_j / N_0 = g_j / g_0 e^{-\Delta E/kT} \quad \dots\dots\dots(\text{ข-1})$$

เมื่อ

- $N_j$  และ  $N_0$  = จำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น
- $g_j$  และ  $g_0$  = Statistical weight ของสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น ซึ่งบอกถึงจำนวนสถานะของอิเล็กตรอน ที่มีพลังงานเท่ากันของแต่ละระดับควอนตัม
- $\Delta E = h\nu = E_j - E_0$  = ระดับพลังงานที่แตกต่างกัน ระหว่างสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น
- $k$  = Boltzmann Constant =  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/deg
- $T$  = อุณหภูมิในหน่วยขององศาสมบูรณ์

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า  $N_j / N_0$  จะมีค่ามากเมื่อ T สูงขึ้น และ  $\Delta E$  น้อย  
 และ  $N_j / N_0$  จะมีค่าน้อยเมื่อ T ต่ำขึ้น และ  $\Delta E$  มาก  
 ความสัมพันธ์ของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิ 2000 K และ 3000 K

ธาตุ	Resonance line (nm)	$g_j/g_0$	$\Delta E$ (ev)	$N_j/N_0$	
				2000 K	3000 K
Na	589.0	2	2.10	$9.86 \times 10^{-6}$	$5.88 \times 10^{-4}$
Ca	422.7	3	2.93	$1.21 \times 10^{-7}$	$3.69 \times 10^{-5}$
Cu	324.8	2	3.82	$4.82 \times 10^{-10}$	$6.65 \times 10^{-7}$
Mg	285.2	3	4.35	$3.35 \times 10^{-11}$	$1.50 \times 10^{-7}$
Zn	213.9	3	5.80	$7.45 \times 10^{-15}$	$5.50 \times 10^{-10}$

จากตารางข้างบนนี้จะเห็นได้ว่า จำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งจะเป็นแหล่งให้อิอมิสซ์ออกมาในการศึกษาอิอมิสซ์สเปกโทรสโกปีนั้น มีน้อยกว่าจำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นมาก ๆ นี่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางอะตอมมิกอิมิสซ์สเปกโทรสโกปีได้รับความนิยม และมีข้อได้เปรียบกว่าอะตอมมิกออบเซอร์พชั่นสเปกโทรสโกปี ทั้งในเชิง sensitivity และ detection limit เพราะการวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณมาก ๆ ย่อมจะง่ายกว่าการตรวจและการวัดธาตุที่มีปริมาณน้อยๆ นั่นคือ  $N_0$  ย่อมง่ายกว่าวัด  $N_j$  นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta E$  นี้บอกให้ทราบว่าธาตุบางธาตุถูกกระตุ้นได้ง่าย Cu และ Zn อุณหภูมิที่ใช้ก็มีส่วนสำคัญในการจะทำให้เกิดอะตอมเสรี แต่จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิของเปลวไฟ 3000 K จะเปลี่ยนอะตอมเสรีให้อยู่ในสถานะกระตุ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 2000 K

สำหรับค่า  $g_j$  และ  $g_0$  เป็น statical weight ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็น (probability) ที่อิเล็กตรอนจะอยู่ในระดับพลังงานที่กำหนดให้ และสามารถหาได้จากการคำนวณทางกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) ในสมการที่ (ข-1) สามารถคำนวณหาค่าของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิใดที่กำหนดให้ได้ เมื่อทราบความถี่หรือความยาวคลื่นที่ธาตุจะเกิดการานซีชัน ดังแสดงในตารางที่ (ข.1)

Statis weight หาได้จาก  $g = 2J+1$  .....(ข-2)

เมื่อ

J = Russell - Saunders coupling

J = L + S หรือ L - S

L = Total orbital angular momentum number

= 0,1,2,3

S = Spin quantum number =  $\frac{1}{2}$

โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูป  $N^M Lg$

N = Principal quantum number

M = multiplicity

เช่น การเกิดทรานซิชันของ Cs 852.1 nm เป็นการเกิดจาก

$$2_{p3/2} \quad 1_{s1/2} \text{ และ } g_j / g_o = [ 2^{(3/2)} + 1 / 2^{(1/2)} + 1 ] = 4/2 = 2$$

อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ( $N_j$ ) เมื่อกลับมาอยู่ในสถานะพื้น ( $N_o$ ) โฟตอนจะออกมา โดยมีความเข้มของ emission lines ( $I_v$ ) หาได้จาก

$$I_v = V A_{oj} h \nu N_o (g_j / g_o) e^{-\Delta E/kT} \dots\dots\dots(ข-3)$$

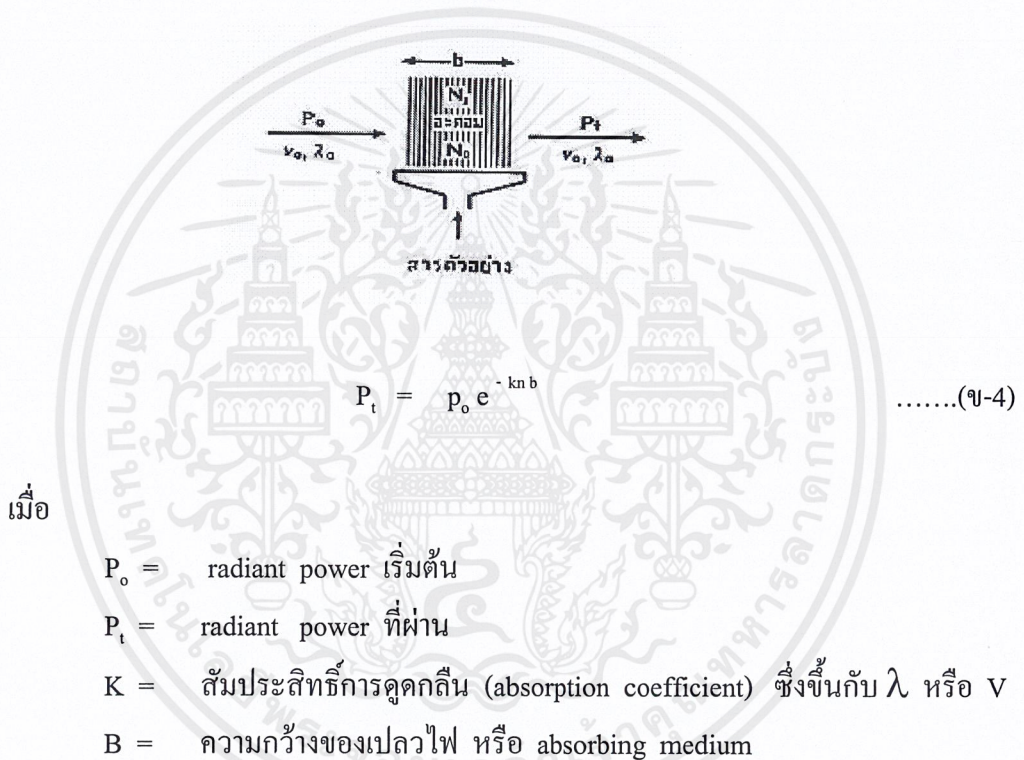
เมื่อ

V = ปริมาณของเปลวไฟที่เห็นโดยดีเทคเตอร์

$A_{oj}$  = Einstein probability coefficient ในการเกิดทรานซิชันจาก  $E_j \rightarrow E_o$  ต่อหน่วยเวลาโดยมีการให้โฟตอนออกมา

เวลาโดยมีการให้โฟตอนออกมา

จากสมการที่ (ข-3) นี้ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเส้นสเปกตรัมที่เปล่งออกมาเป็นฟังก์ชันกับ  $\Delta E$  และ  $T$  ในทำนองเดียวกันอะตอมที่อยู่สถานะพื้น ( $N_0$ ) ก็จะเกิดทรานซิชันจาก  $E_j \rightarrow E_0$  โดยดูดกลืนพลังงานที่ความถี่เท่ากับ resonance frequency และ hollow cathode lamp ที่ผ่านเข้าไปในเปลวไฟ ซึ่งมีอะตอมของธาตุที่ต้องการหาอยู่ ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นไปตาม absorption law



### หลักการใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)

1. วิธีการใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้
  - 1.1 เปิดถังแก๊สอะเซทิลีนปรับความดันของแก๊สเท่ากับ  $0.9 \text{ kg/cm}^2$  และเปิดปั๊มอากาศปรับความดันเท่ากับ  $3.5 \text{ kg/cm}^2$
  - 1.2 เปิดสวิทช์ Power เครื่องจะถูก set ให้สมบูรณ์ภายใน 35-140 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

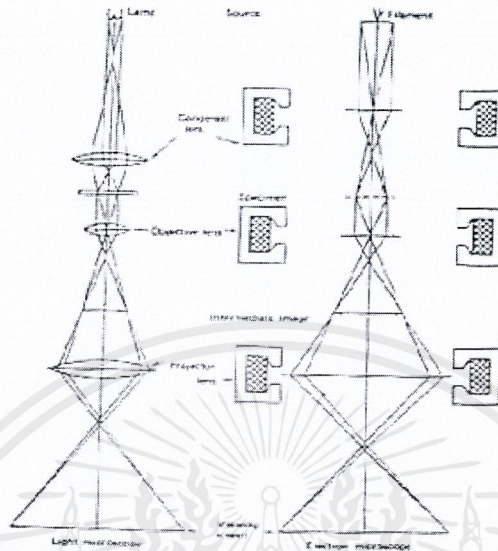
- 1.3 กดปุ่ม Mode เลือก BGC เพื่อเปิดหลอด D<sub>2</sub> Lamp
- 1.4 ใส่หลอด Hollow Cathode Lamp ในตำแหน่งที่ 2 เปิด HC Lamp โดดกด # ใส่ 2 Enter
- 1.5 กดปุ่มเพื่อเลือกชนิดของ Fuel gas
- 1.6 กดที่ element เพื่อเลือกธาตุ
- 1.7 กด F1 เพื่อดูสถานะที่เหมาะสมของการดำเนินงานของธาตุแต่ละธาตุ
- 1.8 กด CONC CALIB เพื่อเลือกทำ Normal Calibration หรือ Standard addition โดยกด CONC หรือ STD ADDN แล้ว Enter
- 1.9 เลือก SIGHAL PROC โดยกด Enter และ Analog out โดยกด 2 Enter
- 1.10 ป้อนความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน
- 1.11 เช็ค Leak โดยกดปุ่ม Leak Check ปรับอัตราการไหลของอากาศเป็น 8.0 l/min
- 1.12 จุดเปลวไฟโดยกด IGNITE
- 1.13 กดปุ่ม Start/Stop เพื่อเริ่มพิมพ์ผล
- 1.14 ดูดสารละลายแบลนด์แล้วกดปุ่ม BLANK จนไฟดับแล้วเอาแบลนด์ออก
- 1.15 วัดการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นแรกแล้วกดปุ่ม STANDARD รอจนกว่าไฟจะดับแล้วจึงเอาสารออก
- 1.16 ดูดสารละลายแบลนด์รอก่อนค่าการดูดกลืนแสงเป็นศูนย์
- 1.17 วัดการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นต่อไปทำซ้ำข้อ 15 และ 16 จนครบทุกความเข้มข้น
- 1.18 เครื่องเขียนกราฟให้จนเสร็จ ถ้าต้องการตัดค่าใดค่าหนึ่งออกไปให้กด DATA OMIT แล้วป้อนหมายเลขสารละลายมาตรฐาน แล้ว Enter 2 ครั้ง แล้วเครื่องจะเขียนกราฟใหม่ให้อีก แต่ถ้าไม่ต้องการตัดค่าใดค่าหนึ่งให้กด Enter 2 ครั้ง
- 1.19 ดูดสารละลายตัวอย่างเข้าสู่เปลวไฟ กด MEASURE เครื่องจะบันทึกค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นให้ ทำเช่นนี้จนครบสารละลายตัวอย่าง
- 1.20 กดปุ่ม Start/Stop เพื่อหยุดการทำงาน

## กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope : SEM)

การออกแบบโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนให้สามารถศึกษาโครงสร้างไมโครบนพื้นผิววัตถุด้วยเทคนิคระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน เรียกว่า SEM (Scanning Electron Microscope) นอกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีขีดความสามารถในการมองเห็นสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงแล้ว ผลของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ตกกระทบบนชิ้นตัวอย่างยังเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์พลอยได้ทางกายภาพ เช่นการเรืองรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ การเรืองแสงของชิ้นตัวอย่างทำให้ระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถเพิ่มอุปกรณ์ในกาวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและปริมาณควบคู่ไปกับการศึกษาโครงสร้างและผิวตัวอย่างจากภาพไมโครกราฟจึงช่วยให้สามารถศึกษารายละเอียดของชิ้นวัตถุได้กว้างขึ้น ดังนั้นปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงเป็นเครื่องมือวิจัยหลักที่จำเป็นและมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงเป็นอย่างมาก

### 1. หลักการเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

การพัฒนากล้องจุลทรรศน์เพื่อให้เกิดการมองเห็น โครงสร้างไมครดด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนนั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการคือ 1) ความสามารถในการแจกแจง (resolving power) 2) กำลังขยาย (magnification) 3) ความคมชัดและความชัดเจนของภาพ (focus and contrast) องค์ประกอบทั้ง 3 ประการที่กล่าวถึงนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของสื่อกลางที่ช่วยให้เกิดการมองเห็น ระบบเลนส์ที่ทำให้เกิดกำลังขยายและอุปกรณ์ประกอบที่ช่วยลดความผิดเพี้ยนของภาพรวมทั้งความคมชัด ไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนก็ตาม จะมีโครงสร้างพื้นฐานคล้ายกันดังแสดงในภาพ โครงสร้างเปรียบเทียบรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

รูปที่ ข.3 แสดงโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่จัดระบบเลนส์แบบลำแสงและลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน จะเห็นว่ามืองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการมองเห็นภาพคล้ายคลึงกัน สามารถเทียบหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ แต่ในเรื่องของกลไกการทำงานแล้วกล้องจุลทรรศน์ทั้งสองชนิดแตกต่างกันอย่างมากเนื่องจากแหล่งแหล่งกำเนิดของสื่อกลางในการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงใช้หลอดไฟฟ้าซึ่งให้ลำแสงผ่านระบบเลนส์แก้วในคอลัมน์ที่มีอากาศได้ การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและการปรับความคมชัดอาศัยระบบกลไกในการควบคุมทั้งหมด ส่วนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะต้องทำงานในคอลัมน์สุญญากาศ โดยจะถูกบังคับด้วยสนามไฟฟ้าศักย์สูงเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสงกำลังขยายของภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเกิดจากการบังคับให้ลำอิเล็กตรอนผ่านสนามแม่เหล็กซึ่งทำหน้าที่คล้ายเลนส์ การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของระบบเลนส์อิเล็กตรอนเป็นการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก การใส่ชิ้นตัวอย่างเพื่อศึกษาจะต้องใส่ในห้องสุญญากาศ รวมทั้งระบบการมองเห็นภาพต้องอาศัยตัวกลางในการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอันตรกิริยาในโครงสร้างไมโครของชิ้นตัวอย่างให้ปรากฏเป็นภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ด้วยเหตุนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงประกอบด้วยระบบต่าง ๆ มากมาย เช่น ระบบสุญญากาศ ระบบกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง ระบบควบคุมอิเล็กตรอนิกส์ ระบบเลนส์อิเล็กตรอน เป็นต้น จึงทำให้มีขนาดใหญ่กว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง และการใช้งานยุ่งยากซับซ้อนกว่าแต่นักวิทยาศาสตร์ทั้งสาขาชีวภาพและกายภาพก็มีความจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพราะมีขีดความสามารถเหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงหลายเท่า ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนยังได้รับการพัฒนาให้มีอุปกรณ์ประกอบเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ธาตุพร้อม ๆ กับการศึกษาภาพไมโครกราฟในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงทำไม่ได้

ตารางที่ ข.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แหล่งกำเนิดแสง	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (EM) ลำอิเล็กตรอน	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง(OM) ลำแสงสว่าง
ความยาวคลื่น	0.0859 Å (20 kV) ~ 0.0251 (200 kV)	7,500 Å (visible) ~ 2,000 Å (ultraviolet)
ตัวกลาง	สุญญากาศ	บรรยากาศปกติ
เลนส์	เลนส์อิเล็กตรอน	เลนส์แก้ว
มุมอเพอเจอร์(aperture)	~35'	~70°
ความสามารถในการแจกแจง	point of point : 3.5 Å Lattice : 1.4 Å	visible : 2,000 Å ultraviolet : 1,000 Å
กำลังขยาย	100X ~ 4500,000X	10X ~ 2,000X
โฟกัส	ปรับได้ต่อเนื่อง	(เปลี่ยนเลนส์ที่ละชุด)
คอนทราสต์	ปรับระบบไฟฟ้า การกระเจิง, การเลี้ยวเบน และ เฟสของคลื่นอิเล็กตรอน	ปรับระบบกล การดูดกลืนแสงและ สะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การมองเห็นภาพด้วยอิเล็กตรอน

ในระยะแรกของการออกแบบและพัฒนากล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงกับระบบเลนส์แก้ว เพื่อให้บรรลุความต้องการด้านความคมชัดและกำลังขยายของกล้อง ได้มีความพัฒนาเลนส์ออปเจกทีฟ (objective lens) เป็นแบบจุ่มน้ำมัน (oil immersion lens) เพื่อให้ได้กำลังขยายสูงกว่าเลนส์แก้วธรรมดา แต่อย่างไรก็ตามระบบกล้องจุลทรรศน์แบบแสงก็มีขีดความสามารถในการแจกแจงอันเนื่องมาจากขนาดความยาวคลื่นของแสง ( $\lambda$ ) และดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางที่ใช้ทำเลนส์แก้ว ทำให้กำลังขยายของกล้องเพียง 2,000 เท่า และความสามารถในการแจกแจงภาพประมาณ 2,000 อังสตรอม เท่านั้น หลังจากนั้นนักวิทยาศาสตร์ค้นพบพฤติกรรมของอิเล็กตรอนซึ่งมีลักษณะคล้ายคลื่นแสง จึงได้มีการนำอิเล็กตรอนมาใช้เป็นสื่อกลางในการมองเห็นภาพโครงสร้างไมโครจีน

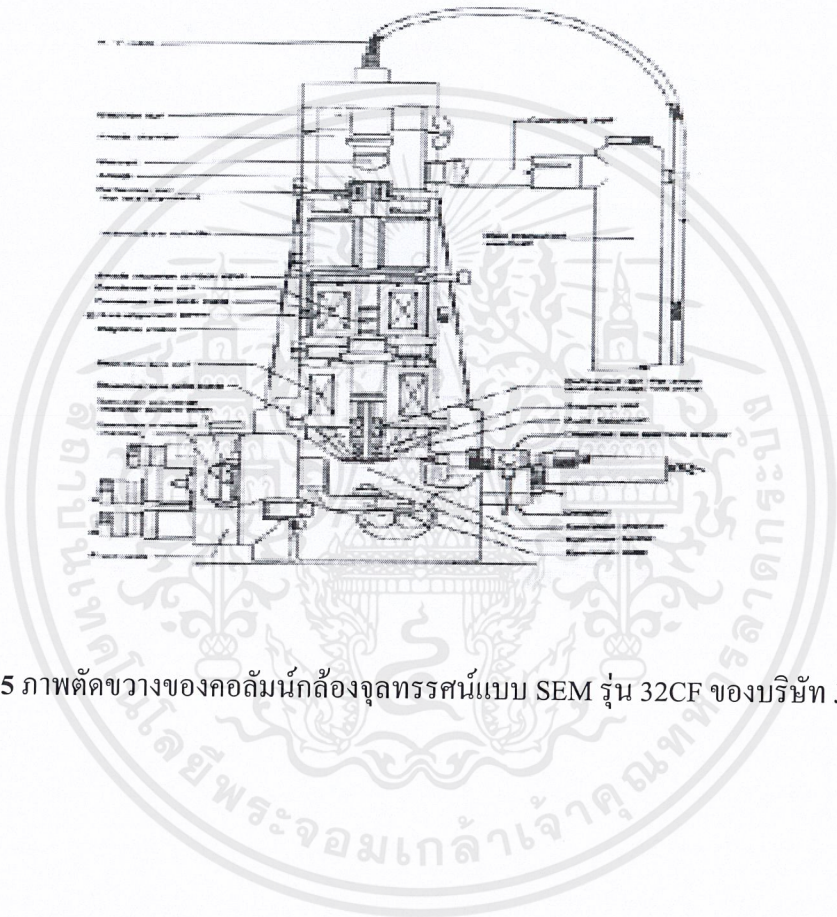
## 3. โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ กล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งสองแบบจะมีโครงสร้างภายนอกคล้ายกันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วนคือ

- ก. ระบบอิเล็กตรอนออปติก (electron optics system)
- ข. ระบบสุญญากาศ (vacuum system)
- ค. ระบบระบายความร้อน (cooling system)
- ง. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply system)
- จ. ระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ (image translating and photo recording)



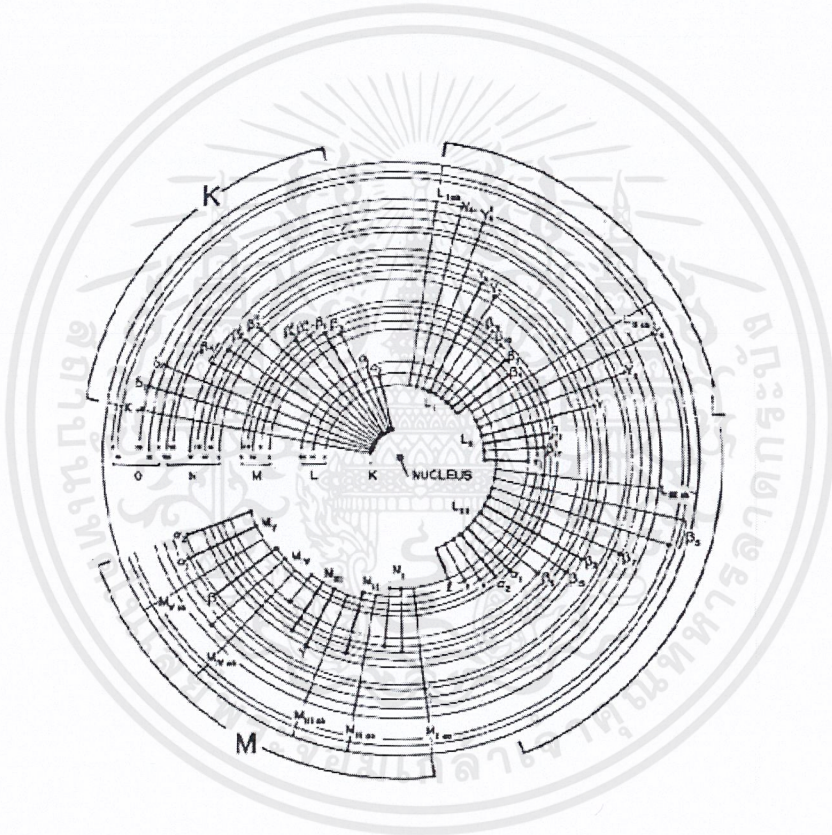
ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ SEM นั้น ดังรูปที่ 5.1 ชิ้นตัวอย่างจะอยู่ใต้เลนส์ออฟเฟกทีฟ ถ้าอิเล็กตรอนในระบบเลนส์จะถูกโฟกัสลงบนผิวของชิ้นตัวอย่างและถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามบริเวณที่ต้องการศึกษาโครงสร้างด้วยระบบสแกนและสร้างสัญญาณภาพขยายอิเล็กตรอนบนจอภาพ การบันทึกภาพจะบันทึกจากจอภาพแคโทดเรย์



รูปที่ 5.1 ภาพตัดขวางของคอลัมน์กล้องจุลทรรศน์แบบ SEM รุ่น 32CF ของบริษัท JEOL

## หลักการทั่วไปและการเกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์

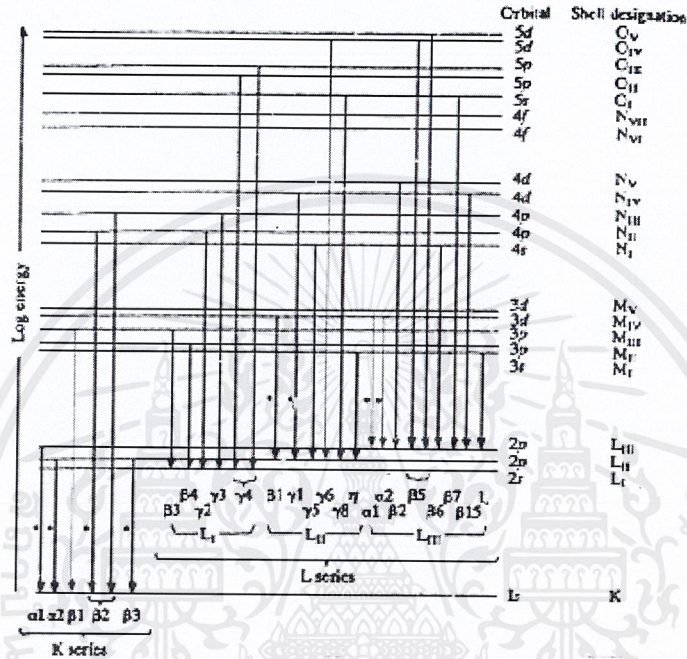
รังสีเอกซ์เกิดขึ้นได้จากการระดมยิง (bombard) วัตถุ เช่น โลหะ หรือสารประกอบ เป็นต้น ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น ลำอิเล็กตรอน (electron beam) หรือโปรตอน หรือโฟตอน (รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา) อิเล็กตรอนของอะตอมที่ประกอบอยู่ในวัตถุนั้นเมื่อถูกระดมยิง ทำให้อิเล็กตรอนในเชลล์ (shell) ในหลุดออกไป เมื่อเกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนจากเชลล์นอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จาก L หรือ  $M \rightarrow K$ ,  $M \rightarrow L$  หรือ  $N \rightarrow M$  จะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 แสดงการเกิดทรานซิชันของอิเล็กตรอนโดยใช้อะตอมมิก โมเดล (atomic model)(แม็น, 2535)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในธาตุยูเรเนียม ดังแสดงในรูปที่ ข.7 โดยทั่วไปรังสีเอกซ์ที่เป็น K และ L-series จะให้ความเข้มสูง ดังที่แสดงด้วยเครื่องหมาย \* ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ ข.7 แสดงระดับพลังงานของธาตุยูเรเนียมเมื่อเกิดอิเล็กตรอนทรานซิชัน ซึ่งแสดงเฉพาะรังสีเอกซ์ของ K และ L-series เท่านั้น (แม้น, 2535)

\* แสดงเส้นสเปกตรัมที่ให้ความเข้มสูง

## เอกซเรย์ สเปกโทรสโกปี (X-ray Spectroscopy) และเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

เมื่อปี ค.ศ. 1895 W.C. Rontgen ได้ค้นพบรังสีเอกซ์ (X-rays) ซึ่งเป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1-100 อังสตรอม หรือ 0.01-10 นาโนเมตร แต่ที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 0.07-0.2 นาโนเมตร รังสีเอกซ์จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์หลาย ๆ อย่าง ดังที่มีผู้ได้รับรางวัลโนเบลไปแล้วหลายท่าน ซึ่งล้วนแต่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารทั้งสิ้น การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น เกิดการเปล่งแสงบางชนิด (emission) การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) หรือเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะ (characteristic) ของแต่ละสารที่เราสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้ดังนี้ คือ

1. ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในสาร (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative)
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

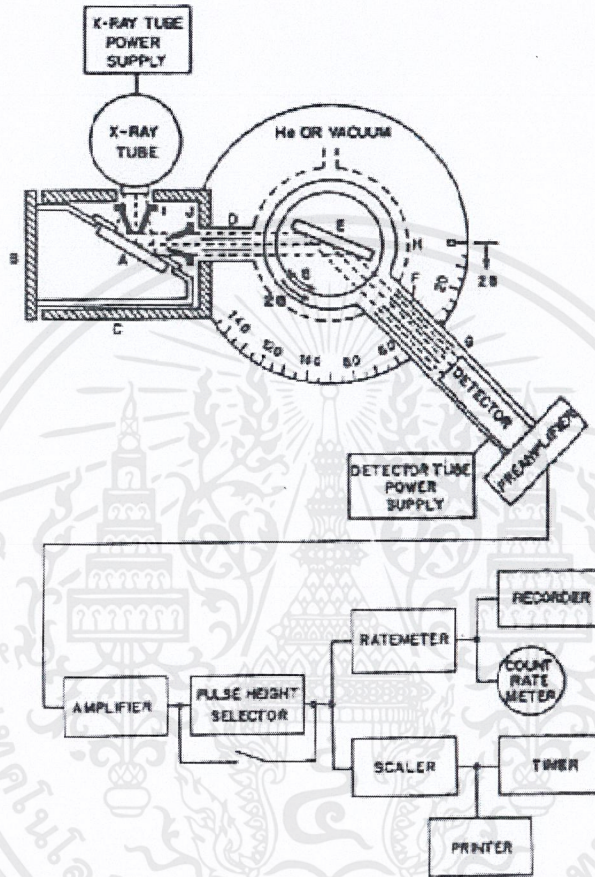
สำหรับเทคนิค X-ray Spectroscopy (XRS) หรือ X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFS) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นแบบที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆทีละธาตุ (sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่มีความทันสมัยสูง ช่วยให้เทคนิคนี้นิยมทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย เพราะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงถึงความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ trace analysis (ppm) ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRFS นี้มีอยู่ 2 ระบบ ด้วยกัน คือ

- ก. ระบบที่วัดเป็นความยาวคลื่น (wavelength dispersion system)
- ข. ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (KeV) (energy dispersion system)

## X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFS)

ลักษณะและองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRFS ชนิด Wavelength Dispersive System



รูปที่ ข.8 ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่อง XRFS

(A)=Sample (B,C)=Sample compartment (D,F,I,J)=Collimator

(E)=Analysing (G)=Detector (H)=Goniometer

เครื่อง XRFS นั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในรูป

### 1. X-Ray Generator ซึ่งประกอบด้วย

- X-Ray tube
- X-Ray power controller
- High voltage transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-X-Ray tube cooling unit

-Filter

## 2. Spectrometer ประกอบด้วย

-sample compartment

-collimator

-analysing crystals

-goniometer

-detectors

## 3. Data system

-computer

-printer

-recorder

### การวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค XRF นั้นมีหลักการดังนี้

ลำรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเครื่อง X-Ray generator ( ซึ่งมีหลอดรังสีเอ็กซ์อยู่ ) จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับค่าต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง แล้วเกิด X-Ray fluorescent ขึ้น ให้ X-Ray fluorescent ผ่าน collimator เพื่อทำให้ลำรังสีเอ็กซ์เป็นลำขนานและไปในทางที่ต้องการ คือให้ไปตกกระทบกับ analysing crystals ซึ่งอยู่ใน spectrometer ที่ทำให้เป็นสุญญากาศหรือความกดดันต่ำมากๆ analysing crystals นี้จะทำหน้าที่กระจายแสงหรือแยกรังสีเอ็กซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน คล้ายกับเกรตติงทำหน้าที่แยกลำแสง รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน จะถูกวัดความเข้มหรือกำลังด้วยการ scan ของ detector สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่อง printer หรือ recorder จากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณได้

### เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction)

วิธี X-ray diffraction เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับทดสอบวัตถุที่เป็นผลึกหรือไอ ส่วนของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับการกระเจิงของโครงร่างผลึก การกระเจิงของรังสีจะสามารถสังเกตได้โดยตรงโดยลำแสงที่สะท้อนจากผลึกในแนวราบ X-ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive method) โดย

ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

### หลักการและวิธีวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกันซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  ซึ่งค่า  $d$  จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึกในปี ค.ศ.1912 W.H.Bragg และ W.L.Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมในผลึกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  รังสีเอกซ์บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ(เลี้ยวเบน)ที่มุมสะท้อน  $\theta$  เท่ากับมุมตกกระทบ ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ ถูกเสนอในรูปสมการ  $d \sin \theta = n\lambda$  ซึ่งสมการดังกล่าวนี้เรียกว่า “ Bragg's law ”

ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ซึ่งอยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากเส้นลวดซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเข้มสูงเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งโดยทั่วไปมักจะทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้วงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไป จึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L และ M shell) เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอกซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่างและรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์ (detector)

### เครื่องมือประกอบด้วย

1. X-ray Generator ที่ประกอบด้วยหลอด X-ray และอุปกรณ์สำหรับควบคุมและการทำให้ความเข้ม ของลำแสงสม่ำเสมอ
2. X-ray tube มักเป็นหลอดที่ใช้ขั้ว cathode ที่มีเส้นลวดร้อนที่เป็นไส้หลอดไฟ ความต่างศักย์ไฟฟ้าของหลอดจะขึ้นอยู่กับขั้ว anode และมีค่าระหว่าง 30 ถึง 80 โวลต์

3. Filter ลำแสงที่ปล่อยออกมาประกอบด้วยอนุกรมลำดับต่อเนื่องและลักษณะเฉพาะของความยาวคลื่น ซึ่งส่วนหลังจะขึ้นอยู่กับธาตุเป้าหมายของ anode สำหรับวิธีการเลี้ยวเบน การวัด monochromatic X-ray เป็นสิ่งที่สำคัญมาก ซึ่งทำได้โดย

- การใช้ absorption edge filter
- การใช้ crystal monochromator แทนก่อนหรือหลังตัวอย่าง
- การแบ่งแยกพลังงาน

Detector สำหรับ detector ของลำแสงสะท้อนของวัตถุที่เป็นผลึกสามารถแบ่งได้ 2 อย่างคือ

1. ลำแสงสะท้อนถูกวัดที่เวลาเดียวกัน ในระยะที่ไวต่อการเกิดภาพถ่ายบนฟิล์ม ด้วยวัตถุประสงคืนี้จะใช้ chamber ที่ต่างกัน
2. การสะท้อนที่ต่างกัน ถูกวัดอย่างต่อเนื่อง เพียงกำหนดมุมกระจายที่เหมาะสมแก่ detector และ detector นี้มักใช้ใน powder diffractometers

## ภาคผนวก ค

## คุณสมบัติของน้ำชะจากกองขยะอ่อนนุชเก็บจากบ่อที่จุดเทกอง

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของน้ำชะจากกองขยะอ่อนนุชเก็บจากบ่อที่จุดเทกอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ได้
pH	-	7.0-8.6
TS	mg/l	3,275-21,541
TVS	mg/l	985-8,176
TSS	mg/l	81.9-2,733
TVSS	mg/l	51.7-1,085.4
TOC	mg/l	790-2,875
COD	mg/l	986.7-9,21.6
BOD <sub>5</sub>	mg/l	178.3-1,881.1
TNK	mg/l as NH <sub>3</sub> -N	258.7-2,198.6
Organic-N	mg/l as NH <sub>3</sub> -N	101.2-44.3
NH <sub>3</sub> -N	µg/l	7.5-1,758.3
Total-P	mg/l as P	18.4-69.6
Total-Alk	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	850-9.15
VFA	mg/l as CH <sub>3</sub> COOH	160-2,307
Chromium	mg/l	97.6-2,325.4
Sulphate	mg/l	42.7-34.2
Fat Oil and Grease	mg/l	575-2,176.4
PCB	mg/l	<0.7
Chromium	mg/l	<0.1
<b>Mercury</b>	mg/l	3.8-4.7
Color	Pt-Co scale	2,550-45,450
Conductivity	Mhos/cm	0.57*10 <sup>4</sup> -4.2*10 <sup>4</sup>
Ordor	-	Early smell Ammonia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

ตารางที่ ง. 1 ตารางแสดงผลของขนาดของกระดองหมีกต่อการดูดซับ

### 35-100 เมช

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.152	0.783
2	0.146	0.750
3	0.146	0.755
4	0.142	0.734

ค่าเฉลี่ย                      0.755

ชุดควบคุม                      3.991

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ                      80.93

### 100-200 เมช

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.111	0.570
2	0.125	0.644
3	0.118	0.610
4	0.121	0.622

ค่าเฉลี่ย                      0.615

ชุดควบคุม                      3.994

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ                      84.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ง.2 ตารางแสดงผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับ

### พีเอช 7

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.118	0.615
2	0.138	0.714
3	0.139	0.720
4	0.121	0.624

ค่าเฉลี่ย 0.656

ชุดควบคุม 3.988

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 83.58

### พีเอช 8

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.133	0.690
2	0.134	0.692
3	0.132	0.680
4	0.143	0.738

ค่าเฉลี่ย 0.693

ชุดควบคุม 3.995

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 82.74

## พีเอช 9

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.146	0.751
2	0.118	0.606
3	0.139	0.717
4	0.147	0.761

ค่าเฉลี่ย 0.716

ชุดควบคุม 3.986

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 82.04

## ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงผลของอัตราการบินกวนต่อการดูดซับ

50 รอบ/นาที

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.147	0.758
2	0.157	0.814
3	0.149	0.773
4	0.155	0.803

ค่าเฉลี่ย 0.787

ชุดควบคุม 3.990

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 80.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 100 รอบ/นาที

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.148	0.768
2	0.132	0.684
3	0.140	0.722
4	0.146	0.753

ค่าเฉลี่ย 0.722

หาค่าควบคุม 3.987

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 81.89

## 150 รอบ/นาที

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.113	0.584
2	0.119	0.617
3	0.117	0.603
4	0.130	0.675

ค่าเฉลี่ย 0.626

หาค่าควบคุม 3.985

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 84.27

200 รอบ/นาที

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.097	0.503
2	0.107	0.554
3	0.116	0.601
4	0.113	0.586

ค่าเฉลี่ย 0.554

ชุดควบคุม 3.989

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 86.09

ตารางที่ ง.4 ตารางแสดงผลของเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับ

1 ชั่วโมง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.152	0.789
2	0.155	0.803
3	0.153	0.791
4	0.135	0.699

ค่าเฉลี่ย 0.764

ชุดควบคุม 3.997

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 80.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3 ชั่วโมง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.143	0.738
2	0.139	0.719
3	0.140	0.726
4	0.135	0.699

ค่าเฉลี่ย 0.714

หาค่าความเข้มข้น 3.990

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 82.10

## 5 ชั่วโมง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.135	0.701
2	0.132	0.683
3	0.135	0.698
4	0.139	0.717

ค่าเฉลี่ย 0.700

หาค่าความเข้มข้น 3.988

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 82.45

## 7 ชั่วโมง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.133	0.688
2	0.130	0.671
3	0.135	0.700
4	0.130	0.675

ค่าเฉลี่ย 0.678

ชุดควบคุม 3.997

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 83.02

## ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงผลการศึกษาไอโซเทอม

3 mg/L

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.046	0.451
2	0.046	0.446
3	0.052	0.508
4	0.046	0.454

ค่าเฉลี่ย 0.462

ชุดควบคุม 3.987

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 88.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 mg/L

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.092	0.905
2	0.091	0.893
3	0.106	0.768
4	0.096	0.936

ค่าเฉลี่ย 0.906

หาค่าความคลาดเคลื่อน 3.986

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 77.25

7 mg/L

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.145	1.412
2	0.144	1.402
3	0.126	1.226
4	0.134	1.306

ค่าเฉลี่ย 1.335

หาค่าความคลาดเคลื่อน 3.983

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 66.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9 mg/L

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.272	1.847
2	0.287	1.962
3	0.272	1.843
4	0.274	1.875

ค่าเฉลี่ย 1.882

หาค่ารวม 9.042

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 79.19

ตารางที่ ง.6 ตารางแสดงผลการศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริง

น้ำชะจากกองขยะมีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 1.334 mg/L

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าความเข้มข้น (mg/l)
1	0.103	0.317
2	0.115	0.358
3	0.114	0.352
4	0.097	0.337

ค่าเฉลี่ย 0.341

หาค่ารวม 1.326

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 74.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ.

### การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริง

ประสิทธิภาพการกำจัดหาได้จาก

$$\frac{(\text{ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ}) \times 100}{(\text{ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น})}$$

จากรูปที่ 4.10 ได้สมการเส้นตรง คือ

$$\log (X/M) = 0.749 \log C_c + 0.3488$$

แทนค่า  $C_c = 0.341 \text{ mg/l}$

$$\log (X/M) = 0.749 (\log 0.341) + 0.3488$$

$$\log (X/M) = 0.749 (-0.3498) + 0.3488$$

$$\log (X/M) = -0.001$$

$$X/M = 0.9977$$

$$X = 0.9977 \times 0.2$$

$$X = 0.1995 \text{ mg}$$

จากการคำนวณ กระดองหมีก็สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 0.1995 mg ใน 100 ml หรือ 1.995 mg/l

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด} &= [(2.336 - 0.341)/2.336] \times 100 \\ &= 85.40 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของกระดอง  
หมีก นำมาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจริงได้ โดย

น้ำเสียจริงมีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น = 1.326 mg/l

Blank มีค่าความเข้มข้นของแคดเมียม = 1.326 mg/L

ความเข้มข้นของแคดเมียมที่กระดองหมีกดูดซับไป = 1.326 - 0.341

$$= 0.985 \text{ mg/l}$$

ดังนั้น

กระดองหมีกดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียจริงได้ = 0.985 mg ใน 100 ml หรือ 0.985 mg/l

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด} = [(1.326 - 0.341) / 1.326] \times 100$$

$$= 74.28 \%$$