

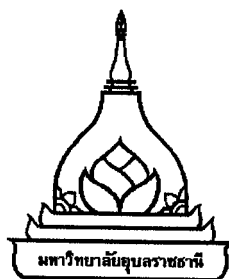
การใช้ประโยชน์จากมูลโคและถ่านมูลโค สำหรับดูดซับสารละลายทองแดง
ในน้ำสังเคราะห์

ชนยิตรี แสงวิจิตร

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2549

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**THE UTILIZATION OF COW DUNG AND COW DUNG CHAR COAL FOR
ADSORBING COPPER SOLUTION FROM SYNTHETIC WATER**

CHONYITREE SANGWIJIT

**AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**

YEAR 2006

COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การใช้ประโยชน์จากมูลโคและถ่านมูลโค สำหรับดูดซับสารละลายทองแดงในน้ำสังเคราะห์

ผู้วิจัย นางชนยิตรี แสงวิจิตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

สมภพ สอนองราชบุรี	อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนองราชบุรี)	
นพ. อ.ดร.	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาดา สอนองราชบุรี)	
ดร.มูจินทร์ พูนประสิทธิ์	กรรมการ
(ดร.มูจินทร์ พูนประสิทธิ์)	
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โกลา	คณบดี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2549

กิตติกรรมประกาศ

หัวข้อค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยเพราะความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมภพ สนองราษฎร์ อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ในการช่วยชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำหัวข้อค้นคว้าอิสระด้วยดีตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาดา สนองราษฎร์ และ ดร. มุจลินทร์ พูนประสิทธิ์ กรรมการการสอบค้นคว้าอิสระ ซึ่งทั้งสองท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขรูปเล่มให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ที่ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อ และให้ทุนพัฒนานักศึกษา จึงทำให้การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำหัวข้อค้นคว้าอิสระ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมผล คุณแม่ประหยัด ดีกลิ่น และคุณแม่พูลสวัสดิ์ คุณพ่อสุนทร พรหมขุนทอง ในการช่วยให้กำลังใจในการเรียนและดูแลครอบครัวในระหว่างศึกษาจนทำให้วันนี้ได้

ท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณประภากรณ์ เด็กหญิงเมธิยาณี แสงวิจิตร สามีและลูกสาวอันเป็นที่รัก รวมทั้งญาติพี่น้อง และพี่ เพื่อน น้องๆ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รุ่น 3 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ทุกคน ที่ช่วยเหลือในการทำหัวข้อค้นคว้าอิสระในครั้งนี้

ชนิตร์ แสงวิจิตร

(นางชนิตร์ แสงวิจิตร)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

- ชื่อเรื่อง : การใช้ประโยชน์จากมูลโคและถ่านมูลโคสำหรับดูดซับสารละลาย ทองแดงในน้ำ
สังเคราะห์
- โดย : ชนิตรี แสงวิจิตร
- ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สนองราษฎร์
- ศัพท์สำคัญ : ตัวดูดซับ โลหะหนัก ทองแดง มูลโค ถ่านมูลโค

การค้นคว้าอิสระนี้ มีวัตถุประสงค์หลัก คือการใช้มูลโคและถ่านมูลโค สำหรับดูดซับสารละลายทองแดงในน้ำสังเคราะห์ จากผลการศึกษาพบว่า สำหรับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์เริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านมูลโคมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงดีกว่ามูลโคทุกกรณีศึกษา โดยปริมาณมูลโคและถ่านมูลโคที่เหมาะสมเท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของสารละลายทองแดง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าร้อยละ 70 และ 95 ตามลำดับ ลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ สามารถใช้สมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดลิช อธิบายได้ดี ($r^2 > 0.9$) สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมของมูลโคและถ่านมูลโค เท่ากับ 4 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาเข้าสู่สมดุล 30 นาที แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านมูลโคมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวดูดซับมากกว่ามูลโค เนื่องจากสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดงหลังการดูดซับด้วยมูลโคมีความเข้มข้นสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งมาก ประกอบกับพื้นที่ผิวของถ่านมูลโคและมูลโคเท่ากับ 302.43 และ 32.63 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ โดยรูพรุนส่วนใหญ่ของถ่านมูลโคเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง $< 20 \text{ \AA}$) แต่รูพรุนส่วนใหญ่ของมูลโคเป็นรูพรุนขนาดกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20-250 \AA) ซึ่งจากภาพถ่าย SEM มีการตรวจพบผลึกของทองแดงที่ผิวของมูลโค และถ่านมูลโค

ABSTRACT

TITLE : THE UTILIZATION OF COW DUNG AND COW DUNG CHAR COAL
 FOR ADSORBING COPPER SOLUTION FROM SYNTHETIC WATER
 BY : CHONYITREE SANGWIJIT
 DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
 MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING
 CHAIR : ASST. PROF. SOMBHOP SANONGRAJ, Ph.D.

KEYWORDS : ADSORBENT / HEAVY METALS / COPPER / COW DUNG /
 COW DUNG CHAR COAL

The main objective of this independent study includes the utilization of cow dung and cow dung char coal for adsorbing copper ion in synthetic water. For all sets of experiment with the initial concentration of copper solution 20 mg/l, the cow dung char coal yielded a better removal efficiency as compared to the cow dung. The suitable treatment dosage was found to be about 1 g/100 ml copper solution. At this dosage, the copper removal efficiencies of higher than 75% and 90% were obtained for cow dung and the cow dung char coal, respectively. The adsorption isotherm was well described by the Langmuir and freundlich equations ($r^2 > 0.9$). For the equilibrium time at 30 minutes, the appropriate pH values for the cow dung and cow dung char coal were around 4 and 2, respectively. However, the relatively high concentrations of organic carbon were measured in the treated solution with the cow dung. Therefore, the cow dung char coal has a greater potential to be used as an adsorbent. The study of microstructure showed that the cow dung char coal had higher surface areas in which the surface areas of 302.43 and 32.63 m^2/g were received for the cow dung char coal and cow dung, respectively. The pore sizes mostly found in the cow dung char coal and cow dung were micropore (diameter $< 20 \text{ \AA}$) and mesopore (diameter 20-250 \AA). The SEM reveals the depositions of copper on the surface of cow dung char coal and cow dung.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 น้ำเสียและประเภทของเสีย	3
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	3
2.3 โลหะหนัก	5
2.4 การกำจัดโลหะหนักด้วยชีวมวล	11
2.5 ทฤษฎีการดูดซับหรือการดูดติดผิว	15
2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	18
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว	22
2.8 มุลโค	23
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีการทดลอง	25
3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ	25
3.1.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มของการดูดซับ	25
3.1.3 การศึกษาเวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ	26
3.1.4 การศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดงหลังการใช้มูลโคและถ่านมูลโคในการดูดซับ	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.5 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์	26
3.1.6 การศึกษาจุดโครงสร้างของตัวดูดซับ	26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์	28
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง	28
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ล้างเครื่องแก้ว	28
4 ผลการศึกษาและวิจารณ์	
4.1 ลักษณะทางกายภาพของมูลโคและถ่านมูลโค	29
4.2 ปริมาณที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มของการดูดซับ	30
4.3 เวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ	34
4.4 ปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดงหลังการใช้ มูลโคและ ถ่านมูลโคในการดูดซับ	36
4.5 ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์	37
4.6 จุดโครงสร้างของตัวดูดซับ	38
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก	
ก ผลการทดลอง (ปริมาณที่เหมาะสม)	50
ข ผลการทดลอง (เวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ)	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ก ผลการทดลอง (ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์)	59
ง กราฟมาตรฐานสำหรับวัดหาปริมาณทองแดง	61
จ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2	64
ฉ ค่าวิเคราะห์พื้นที่ผิว (จุลโครงสร้างตัวดูดซับ)	68
ช เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (จุลโครงสร้างตัวดูดซับ)	72
ซ ภาพกิจกรรมการทดลอง	75
ประวัติผู้วิจัย	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แหล่งที่มาและผลกระทบของโลหะทองแดงที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์
2.2	สถานะมาตรฐานสำหรับการชุบทองแดงแบบกรด
2.3	คุณลักษณะของน้ำเสียจากระบวนการผลิตของโรงงานชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียมก่อนเข้าระบบบำบัด
2.4	เปรียบเทียบความสามารถและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดง
2.5	เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับโดยมุลโคและถ่านมุลโค
4.2	ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์โดยมุลโคและถ่านมุลโค ตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir) และ ฟรุนดิช (Freundlich)
4.3	ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 2, 4 และ 6 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.4	ปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับ (1 กรัมต่อ 100 มิลลิตร) ณ เวลา 120 นาที
4.5	ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 4 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6	พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของมุลโคและถ่านมุลโค
ก-1	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดของมุลโค ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ก-2	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดของถ่านมุลโค ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ข-1	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของมุลโค รวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 2
ข-2	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของมุลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์) ที่ค่าพีเอช 2
ข-3	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของมุลโค รวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 4

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-4	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์) ที่ค่าพีเอช 4	54
ข-5	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของมูลโค รวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 6	55
ข-6	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์) ที่ค่าพีเอช 6	55
ข-7	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 2	56
ข-8	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์) ที่ค่าพีเอช 2	56
ข-9	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 4	57
ข-10	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์) ที่ค่าพีเอช 4	57
ข-11	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 6	58
ข-12	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์) ที่ค่าพีเอช 6	58
ค-1	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์	59
ค-2	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)	59
ง-1	ตัวอย่างข้อมูลสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการหาความเข้มข้นของทองแดง	62

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แผนผังการแยกน้ำเสียแต่ละประเภทตามขั้นตอนการชุบโลหะทองแดง นิเกิล-โครเมียม	10
2.2	กราฟสำหรับสมการ (2.4) ของ Langmuri	19
2.3	กราฟหาค่า Cs สำหรับสมการ (2.5) BET	20
2.4	กราฟสำหรับสมการ (2.6) ของ BET	20
2.5	กราฟสำหรับสมการ (2.8) ของ Freundlich	21
4.1	ลักษณะของมูลโค	29
4.2	ลักษณะของถ่านมูลโค	30
4.3	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือ กับปริมาณมูลโคและถ่านมูลโค ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง	31
4.4	ไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir)	32
4.5	ไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการฟรอนด์ลิช (Freundlich)	33
4.6	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ) ของมูลโคที่เวลาและค่าพีเอชต่างๆ (ปริมาณมูลโคที่ใช้เท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายทองแดงที่มี ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)	34
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ) ของถ่านมูลโคที่เวลาและค่าพีเอชต่างๆ (ปริมาณมูลโคที่ใช้เท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายทองแดงที่มี ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)	35
4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ) ของถ่านมูลโค ที่ค่าพีเอช 4 (ปริมาณมูลโคที่ใช้เท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายทองแดงที่มี ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร)	37
4.9	การกระจายรูพรุนขนาดกลางของมูลโค	39
4.10	การกระจายรูพรุนขนาดเล็กของถ่านมูลโค	40
4.11	ภาพถ่าย SEM ของมูลโคก่อนและหลังการดูดซับที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า	41
4.12	ภาพถ่าย SEM ของถ่านมูลโคก่อนและหลังการดูดซับที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ง-1	เครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์ชันสเปกโตรสโกปี รุ่น Analyst 200	62
ง-2	ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของทองแดง	54
ช-1	สารละลายทองแดง (Cu^{2+}) ตั้งเคราะห์หลังการดูดซับด้วยมุลโค ที่ค่าพีเอช 2, 4 และ 6	68
ช-2	สารละลายทองแดง (Cu^{2+}) ตั้งเคราะห์หลังการดูดซับด้วยถ่านมุลโค ที่ค่าพีเอช 2, 4 และ 6	68
ช-3	สารละลายมาตรฐานทองแดง	69
ช-4	สีของเปลวไฟขณะวัดสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง AAS	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปนเปื้อนของโลหะหนักที่เกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้นในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีการที่แยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation), การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange), กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis), กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process), การกลั่น (Distillation), กระบวนการเฟอร์ไรต์ (Ferrite process), การทำให้ลอย (Flotation), เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวยังประสบปัญหามากมาย เช่น วิธีการยุ่งยาก ต้องอาศัยผู้มีความชำนาญในการควบคุมระบบ, ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีและเครื่องมือ อุปกรณ์มีราคาแพง สำหรับประเทศไทยมักจะประสบปัญหาในการลงทุนและขาดแคลนเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ทันสมัย (ธีรยุทธ อุดมพร, 2544)

ดังนั้น การนำวัสดุทางธรรมชาติซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตทางการเกษตร มาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักจึงเป็นการศึกษาอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย และมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาด้านของเสียที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้เปลือกไข่ไก่ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารละลายทองแดงเข้มข้น จากโรงงานชุบโลหะ (Sanongraj et al., 2006)

ประเทศไทยเลี้ยงโคทั่วประเทศ ประมาณ 5 ล้านตัว ขับถ่ายเป็นมูลโคคิดเป็น 19 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน (ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กรมปศุสัตว์, 2546) มูลโคมีองค์ประกอบของโปรตีน เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นโพลีเมอร์ชีวภาพที่ซับซ้อน มีคุณสมบัติในการจับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ (Henry and Brierley, 1990)

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการศึกษาและพัฒนามูลโค เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก ซึ่งจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของมูลโค เบื้องต้นได้ทำการสังเคราะห์สารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการใช้ทดสอบปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ตลอดจนจุดโครงสร้าง ไว้เป็นแนวทางในการใช้บำบัดน้ำเสียจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมูลโคและถ่านมูลโคมาใช้ในการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) ในน้ำสังเคราะห์

1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพของมูลโคและถ่านมูลโคในการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์ที่ปัจจัยต่างๆ กัน ได้แก่ ปริมาณของมูลโคและถ่านมูลโคที่เหมาะสม, ระยะเวลา และพีเอชที่เหมาะสม และผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง

1.2.3 ศึกษาพื้นที่จำเพาะ ขนาดรูพรุน และไอโซเทอรั่มของมูลโคและถ่านมูลโค

1.2.4 ศึกษาจุลโครงสร้างของมูลโคและถ่านมูลโค ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+})

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 มูลโคสำหรับนำมาทดสอบเป็นโคที่เลี้ยงแบบปล่อยในทุ่งหญ้า

1.3.2 การศึกษาในครั้งนี้ เป็นแบบ Batch study

1.3.3 น้ำที่ใช้เป็นน้ำสังเคราะห์โดยเตรียมจากคอปเปอร์ซัลเฟต $\text{Cu}(\text{SO}_4)5\text{H}_2\text{O}$ โดยให้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

1.3.4 ช่วงพีเอชที่ใช้ในการทดสอบ คือ พีเอช 2, 4 และ 6 เนื่องจากพีเอชมากกว่านี้อาจเกิดการตกตะกอนของทองแดงในสารละลายก่อนทำการทดลอง

1.3.5 ระยะเวลาสัมผัสตัวอย่าง คือ ที่เวลา 5, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพของมูลโค และถ่านมูลโคในการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) ในน้ำสังเคราะห์ และสภาวะที่เหมาะสมทั้งปริมาณของมูลโคและถ่านมูลโค, ระยะเวลา สัมผัส, พีเอช และผลความเข้มข้นของสารละลายทองแดง

1.4.2 ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการพิจารณานำเอามูลโคและถ่านมูลโคไปใช้กับน้ำเสียจริงที่เกิดจากขั้นตอนการล้างชิ้นงาน หลังจากกระบวนการชุบทองแดงแบบกรดจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียและประเภทของน้ำเสีย (โกศล วงศ์สวรรค์, 2543)

น้ำเสีย หมายถึง ภาวะที่น้ำเสื่อมคุณภาพหรือน้ำมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่เคยเป็นอยู่ตามธรรมชาติ เนื่องจากมีสิ่งเจือปนจนทำให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม

2.1.1 น้ำเสียทางกายภาพ (Physical wastewater) หมายถึง น้ำที่มีสภาพทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ได้แก่ น้ำที่มีอุณหภูมิหรือเย็นเกินกว่าที่สิ่งมีชีวิตจะดำรงอยู่ได้ ควรมีอุณหภูมิ อยู่ระหว่าง 20 – 35 องศาเซลเซียส น้ำที่มีสีเปลี่ยนไปจากสภาพเดิม น้ำที่มีกลิ่นเน่าเหม็น น้ำที่มีรสเปลี่ยนไปจากสภาพเดิม เช่นเปรี้ยวหรือเค็ม และน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) ไม่อยู่ระหว่าง 5.0 – 9.0 เป็นต้น

2.1.2 น้ำเสียทางเคมี (Chemical wastewater) หมายถึง น้ำที่มีการปนเปื้อนไปด้วยสารพิษซึ่งบางครั้งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยสายตาหรือการสัมผัส สารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนได้แก่ โลหะหนัก (Heavy metals) สารกัมมันตรังสี (Radioactive elements) และวัตถุมีพิษ (Pesticides) เป็นต้น

2.1.3 น้ำเสียทางชีววิทยา (Biological wastewater) หมายถึง น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารที่มีพิษต่อสุขภาพอนามัย ได้แก่ เชื้อโรค, พยาธิ, เชื้อรา เป็นต้น

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเพื่อให้มีคุณภาพที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ส่วนใหญ่สามารถแบ่งได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit processes) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสิ่งสกปรกที่มีน้ำหนักมากหรือมีขนาดใหญ่ เช่น ไขมัน ขยะ ทราຍ ซึ่งเป็นการบำบัดเบื้องต้นก่อนที่จะมีการบำบัดในขั้นตอนต่อไป ข้อดีคือทำได้ง่าย ราคาถูก ข้อเสียคือกำจัดได้เฉพาะสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่

2.2.1.1 กระบวนการกรองด้วยตะแกรงใช้คัดพวกขยะ เศษใบไม้ หรืออื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่ารูของตะแกรง

2.2.1.2 กระบวนการตกตะกอน เป็นการปล่อยน้ำมาเก็บไว้ในถังตกตะกอน ทำการตกตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก สามารถตกตะกอน ทราข หิน หรืออนุภาคที่มีน้ำหนักพอที่จะสามารถตกตะกอนได้

2.2.1.3 กระบวนการดักจับไขมันหรือกวาดไขมันออกจากน้ำเสีย ไขมัน หรือน้ำมันมีน้ำหนักเบากว่าน้ำ โดยจะลอยอยู่บนผิวน้ำสามารถกำจัดออกโดยเปิดส่วนบนของถังพักแล้วกวาดน้ำมันออก

2.2.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดหรือแยกสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย วิธีนี้จะต้องมีการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ข้อดี คือสามารถกำจัดสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิดด้วยการเติมสารเคมีเพียงชนิดเดียว ข้อเสีย คือเมื่อมีการเติมสารเคมีลงไปแล้ว ก็จะมีสารเคมีผสมอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อในด้านอื่นๆ เช่น การเกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปจากธรรมชาติ เป็นต้น ตัวอย่างกระบวนการทางเคมีได้แก่

2.2.2.1 กระบวนการปรับสภาพกรด – ด่าง (pH adjustment) คือกระบวนการที่ทำการปรับสภาพกรด – ด่างของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งพีเอชต้องไม่น้อยกว่า 5.5 และ ไม่เกิน 9.0) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดขั้นต่อไป หลักการทั่วไปถ้า น้ำเสียมีฤทธิ์เป็นกรด ก็จะเติมสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ ปูนขาว เป็นต้น ถ้าเป็นด่างจะปรับด้วยสารเคมีประเภทกรด เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน เป็นต้น

2.2.2.2 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) คือ กระบวนการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำให้ไอออน เช่น ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนมีน้ำหนักมากขึ้นทำให้จมตัวลง สารเคมีที่ใช้เติมมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต เป็นต้น ปูนขาวนิยมใช้ตกตะกอนโลหะหนัก ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะสามารถตกตะกอนได้ที่พีเอชต่างๆ กัน ตะกอนที่ได้จะมีองค์ประกอบของโลหะหนักซึ่งจะต้องมีกระบวนการกำจัดต่อไป

2.2.2.3 กระบวนการสร้างรวมตะกอนเคมี (Coagulation–flocculation) คือ กระบวนการที่มีการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอน ได้แก่ สารส้ม ปูนขาว ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็กๆ แล้วทำการกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน ทำให้เป็นตะกอนใหญ่ขึ้น

2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit processes) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมมาย่อยสลายสารต่างๆ ในน้ำเสีย ข้อดีคือมีราคาถูก แต่การควบคุมกระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะต้องควบคุมการทำงานตามปัจจัยต่างๆ ที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เพื่อให้ น้ำเสียมีความสกปรกลดลง จุลินทรีย์อาจเป็นแบบใช้หรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้

2.2.4 กระบวนการทางกายภาพ - เคมี (Physicochemical unit processes) กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยวิธีทางกายภาพและเคมีผสมผสานกัน เป็นวิธีที่อาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง อาศัยเครื่องมือที่มีอุปกรณ์หลายชนิด และมีราคาแพงมากกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียอื่น แต่สามารถกำจัดสารปนเปื้อน ในน้ำได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ประเภทของกระบวนการทางกายภาพ - เคมี ได้แก่

2.2.4.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือ กระบวนการแยกสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยใช้ตัวดูดซับมาทำการดูดซับสารที่ต้องการแยกออกไป ตัวดูดซับที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น ซิลิกา เบนโซไนต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากสามารถกำจัดสี หรือโลหะหนักได้เป็นอย่างดี

2.2.4.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) คือ กระบวนการที่ไอออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับไอออนเรซิน ซึ่งมีทั้งไอออนลบและบวกโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่นการใช้เรซินที่มีไอออนลบกับตะกอนโลหะหนักที่มีประจุบวกเป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยล้างด้วยกรด

2.2.4.3 กระบวนการกรองแบบอุลตราฟิลเตรชัน (Ultra filtration) คือ กระบวนการกรองโดยใช้เยื่อกรองแบบ Porous membrane อัดแรงดันน้ำเข้าไปพอประมาณ ซึ่งทำให้แยกสารปนเปื้อนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ ได้ตั้งแต่ขนาด 2 ถึง 1000 ไมโครเมตร

2.2.4.4 กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) คือ กระบวนการที่แยกสารปนเปื้อนขนาดตั้งแต่ 0.4 ถึง 60 ไมโครเมตร กรองผ่านเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านด้วยความดันสูง

2.3 โลหะหนัก (Heavy metals)

โลหะหนัก หมายถึงโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางพีริออดิก มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติของโลหะหนักทางกายภาพคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีลักษณะเป็น

เงามันวาว เหนียว สามารถนำเป็นแผ่นบางๆ และสะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางเคมี คือ โลหะหนัก มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงมักจะรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex – compound) เพราะเสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งเป็นพิษหากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร เมื่อมีการสะสมในร่างกายอาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้ US EPA (United States Environment Protection Agency) จึงได้กำหนดโลหะหนักที่มีพิษที่ต้องกำจัดออกจากร่างกายก่อนปล่อยทิ้ง ได้แก่ แบรลิเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม เทลเลียม และปรอท ในจำนวนนี้ ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก และตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษถาวร คือไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต

โลหะหนักที่ศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ คือ ทองแดง ซึ่งจะกล่าวถึงคุณสมบัติของทองแดง ในกระบวนการเกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการชุบโลหะเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ดังนี้

2.3.1 ทองแดง (Copper. Cu)

ทองแดงเป็นธาตุในหมู่ 2-B เลขอะตอม 29 เลขมวล 63.546 จุดหลอมเหลว 1.083 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 8.89 กรัมต่อมิลลิกรัม ทองแดงเป็นโลหะเก่าแก่รองลงมาจากทองคำ และเป็นโลหะที่มีความสำคัญ เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัว ได้แก่ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนทานต่อการผุกร่อน สามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย นำไปผสมกับโลหะอื่นได้ดี เช่น ทองเหลือง (ทองแดงกับสังกะสี) Bronze (ทองแดงกับดีบุก) ตลอดจนสามารถนำกลับไปหลอมใหม่ ดังนั้นทองแดงจึงมีการนำไปใช้ประโยชน์มากในทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมงานหล่อ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สำหรับแหล่งที่มาและความเป็นพิษของโลหะหนักทองแดง แสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แหล่งที่มาและผลกระทบของโลหะทองแดงที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์

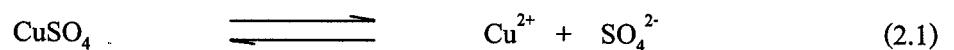
ชนิดโลหะหนัก	แหล่งที่มา	ความเป็นพิษ
ทองแดง	อุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating), โลหะผสมอัลลอยด์และการทำถ่านไฟฉาย	หากร่างกายได้รับปริมาณมาก จะทำให้เป็นโรคโลหิตจาง

สำหรับการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นน้ำทองแดงสังเคราะห์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นกับน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการล้างชิ้นงานหลังจากกระบวนการชุบทองแดงแบบกรด ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะโลหะในหัวข้อต่อไป

2.3.2 การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการประยุกต์เอาวิธีทางไฟฟ้าและเคมีมาใช้ประโยชน์ โดยการนำเอาโลหะชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดไปเกาะหรือห่อหุ้มโลหะชนิดหนึ่ง เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติให้เกิดความทนทานต่อการกัดกร่อนและให้เกิดความสวยงามน่าใช้

หลักการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) หรือตัวนำไฟฟ้า จะประกอบด้วยอนุมูล (Ions) ของโลหะที่ต้องการชุบละลายอยู่ และขั้วลบมักจะเป็นโลหะที่ต้องการเคลือบผิวชิ้นงาน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อนุมูล (Ions) ของอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุไฟฟ้าลบ (Anion) จะวิ่งไปยังขั้วบวก (Anode) และอนุมูลที่มีประจุไฟฟ้าบวก (Cation) จะวิ่งไปเกาะที่ขั้วลบ (Cathode) ซึ่งประจุบวกของอนุมูลของโลหะจะถูกสะเทิน (Neutral) ด้วยอิเล็กตรอนจากวงจรไฟฟ้าให้กลายเป็นอะตอมของโลหะเคลือบเกาะติดอยู่บนผิวของขั้วลบ ขณะเกิดปฏิกิริยา เราจะมองไม่เห็นแต่เราจะสังเกตได้ที่ขั้วลบหรือขั้วบวกโดยจะมีก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) เกาะที่ขั้วลบและออกซิเจน (Oxygen) เกาะที่ขั้วบวก ตัวอย่างของการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบบง่ายๆ เช่น การนำเอาสารประกอบทองแดงซัลเฟต (CuSO_4) มาละลายให้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และทำให้เป็นกรดโดยการเติมกรดกำมะถัน ซึ่งสารละลายทองแดงซัลเฟตเมื่อละลายอยู่ในน้ำจะแยกสลายออกเป็นอนุมูล 2 ชนิด ได้แก่ อนุมูลทองแดง (Cu^{2+}) ที่มีประจุไฟฟ้า และอนุมูลซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่มีประจุไฟฟ้าลบ ดังแสดงในสมการที่ 2.1



น้ำก็จะแตกตัวแยกสลายเป็นอนุมูลเช่นเดียวกัน ที่ขั้วลบ (Cathode) อนุมูลทองแดง (Cu^{2+}) จะรับอิเล็กตรอน 2 ประจุ และเป็นอะตอมของทองแดงมาเกาะอยู่ ดังนั้น ที่ขั้วลบจะมีอนุมูลของ Cu^{2+} หรือ H^+ มาเกาะติดอยู่ สำหรับที่ขั้วบวกซึ่งเป็นโลหะทองแดง จะละลายกลายเป็นอนุมูลของทองแดง อิเล็กตรอน ที่เกิดขึ้นจะวิ่งไปยังขั้วลบ ปฏิกิริยานี้จะเกิดหมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตลอดเวลาที่มีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นหลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ สารประกอบซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแยกสลายตัวเองให้เป็นอนุมูล ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น กรดและสารละลายของเกลือต่างๆ เป็นต้น

การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่ให้กระแสไหลผ่านไว้ ดังนี้

1) ปริมาณน้ำหนักของอนุมูล (Ions) ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ โดยกระแสไฟฟ้า จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

2) ปริมาณน้ำหนักของอนุมูล (Ions) ชนิดต่างๆ ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ โดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆ กัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลเคมีของอนุมูลเหล่านั้น

นั่นก็คือ การที่จะเคลือบผิวโลหะให้มีโลหะมาเกาะที่ขั้วลบ (Cathode) ในปริมาณเท่าๆ กันนั้นสามารถทำได้โดยให้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ และใช้เวลานานๆ หรืออาจจะใช้กระแสไฟฟ้ามากๆ แต่เวลาสั้นๆ และโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการแยกสลายตัวไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวหรือสมมูลของโลหะนั้นๆ ขั้นตอนการชุบโลหะในอุตสาหกรรมมี 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน ขั้นตอนการชุบโลหะ ขั้นตอนการล้าง ขั้นตอนการอบแห้ง ดังจะกล่าวในรายละเอียดนี้ คือ

2.3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนการทำให้ผิวชิ้นงานเรียบไม่ขรุขระและทำความสะอาดผิวเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม เช่น ไขมัน น้ำมันหรือออกไซด์ต่างๆ ออกจากผิวหน้าของชิ้นงานที่นำมาชุบ เข้าสู่ขั้นตอนการชุบ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

1) การจัดชิ้นงานก่อนการชุบ (Polishing) ชิ้นงานก่อนที่จะนำไปชุบต้องนำมาขัดทำความสะอาดเสียก่อน อุปกรณ์ในการขัดประกอบด้วยมอเตอร์ วงล้อผ้า ผงซิลิกา และไขวู การขัด มี 2 แบบคือ การขัดหยาบ และการขัดละเอียด การขัดหยาบ เป็นการขัดขั้นแรกโดยทำความสะอาดขัดเอารอยขูดขีดๆ หรือผิวสม่ำเสมอออกไป โดยอาจใช้ล้อที่เคลือบด้วยทรายหยาบ การขัดละเอียด เป็นขั้นตอน ที่ขัดละเอียดต่อการขัดหยาบ โดยใช้ล้อขัดทรายละเอียดเพื่อให้ผิวชิ้นงานเรียบและเงา สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก อาจใช้มอเตอร์โดยเป็นตัวหมุน ซึ่งชิ้นงานภายในถังหมุนจะเสียดสีกับหินขัด หรืออาจใช้ขัดด้วยถังเขย่า (Vibration) ให้ชิ้นงานเสียดสีกับกับหินขัดทำให้เรียบเป็นเงาได้

2) การทำความสะอาดก่อนชุบ (Cleaning) เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าผิวของชิ้นงานไม่สะอาดพอจะทำให้การชุบไม่ได้ผลดีเพราะโลหะจะเกาะติดกับผิวของชิ้นงานไม่ดี การล้างทำความสะอาดชิ้นงานโดยปกติจะใช้วิธีจุ่มหรือสเปรย์ด้วยสารละลายต่าง เช่น โซดาไฟ หรือสารเคมีอื่นๆ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 3-15 นาที ส่วนแอโนไดอิก เซอร์แฟกแตนท์ และนอนไอออนิก เซอร์แฟกแตนท์ จะทำที่อุณหภูมิ 64-74 องศาเซลเซียส

3) ขั้นตอนการกำจัดสนิมด้วยกรด ขั้นตอนนี้จะทำต่อจากการทำความสะอาดด้วยด่าง โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการกำจัดสนิมหรือฟิล์มออกไซด์ออกจากผิวชิ้นงาน ส่วนใหญ่จะใช้กรดเกลือ หรือกรดไฮดรอกลอริก ซึ่งมีความรุนแรงในการกำจัดสนิมสูง โดยทั่วไปจะใช้เวลาเพิ่มขึ้นของกรดไฮดรอกลอริก 5-15 %

2.3.2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ

ในที่นี้จะเน้นเฉพาะการชุบทองแดง ทองแดงเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่ทนต่อการกัดกร่อนและป้องกันสนิมได้ดี นิยมใช้เคลือบผิวโลหะ เป็นการรองพื้นก่อนชุบนิเกิล และโครเมียมต่อไป มักนิยมเคลือบบนโลหะ เช่น สังกะสี เพื่อป้องกันมิให้สังกะสีสัมผัสกับสารละลายของนิเกิลโดยตรง เพราะสังกะสีอาจจะละลายได้ การชุบทองแดงนี้มีทั้งอย่างเงาและอย่างทึบ นอกจากนี้ยังนิยมชุบทองแดงในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้ดี การชุบโลหะด้วยทองแดงมีอยู่หลายวิธี

1) การชุบทองแดงแบบด่าง (Cyanide copper plating) โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบอยู่ระหว่าง 41-60 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนนี้คือ คอปเปอร์ไซยาไนด์ (Copper cyanide) ความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium cyanide) ความเข้มข้น 23 กรัมต่อลิตร และสารเคมีอื่นๆ

2) การชุบทองแดงแบบกรด (Acid copper plating) โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบอยู่ระหว่าง 25 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 188 กรัมต่อลิตร กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 75 กรัมต่อลิตร และน้ำยาเงา สภาวะมาตรฐานกับการชุบทองแดงแบบนี้แสดงดังตารางที่ 2.2

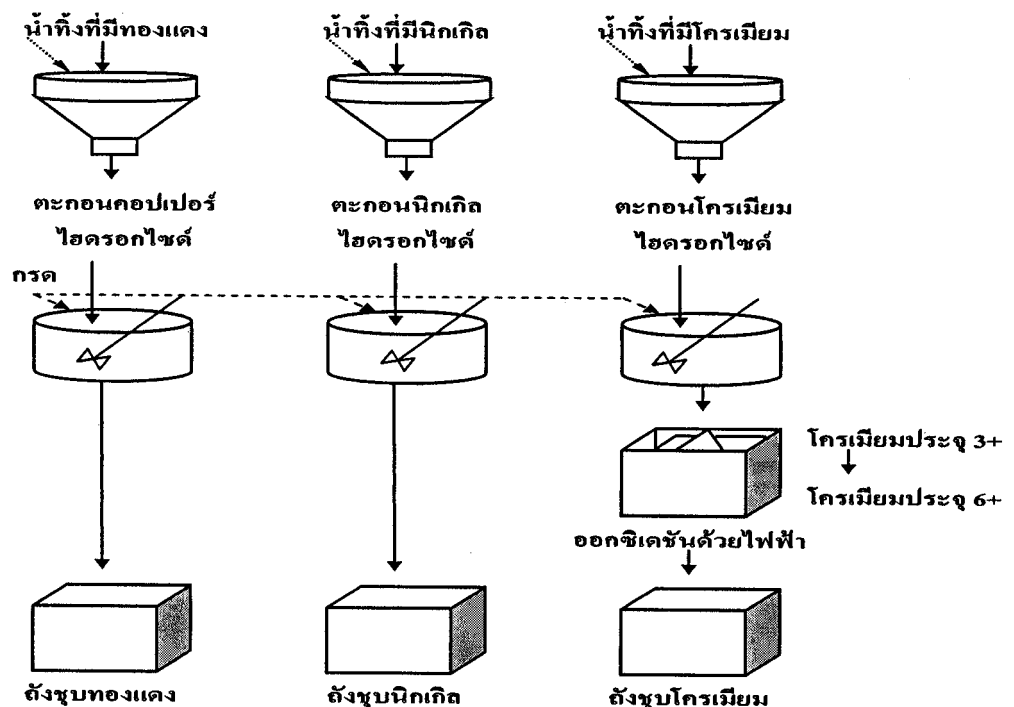
ตารางที่ 2.2 สภาวะมาตรฐานสำหรับการชุบทองแดงแบบกรด

รายการ	หน่วย	ปริมาณ
ส่วนผสมของน้ำยาชุบ		
คอปเปอร์ซัลเฟต(Coppersulfate, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	กรัมต่อลิตร	188
กรดซัลฟูริก(Sulfuric acid, H_2SO_4)	กรัมต่อลิตร	74
น้ำยาเงา	-	ตามคู่มือการใช้ของผู้ผลิต
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	25
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	แอมป์ต่อตารางเดซิเมตร	1-20
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	โวลต์	1-3
ตัวล่อ (Anode)	-	ทองแดงบริสุทธิ์

2.3.2.3 ขั้นตอนการล้างเป็นขั้นตอนการล้างวัตถุดิบและสารเคมีที่ติดมากับชิ้นงาน โดยใช้น้ำสะอาด ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีการใช้น้ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ การล้างมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ การจุ่มล้างและการตักราด

2.3.2.4 ขั้นตอนการอบแห้ง หลังจากขั้นตอนการชุบโลหะ และขั้นตอนการล้างจะนำชิ้นงานไปอบแห้ง การอบแห้งมีอยู่หลายแบบ เช่น การใช้ลมร้อน โดยใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง การผึ่งแดด เป็นต้น

ในสำหรับการบำบัดแบบเก่า โลหะทองแดงจะทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Chelate) เกิดการแยกตัวทำให้เป็นกลาง แล้วจึงตกตะกอน (วลัยรัตน์ จันทรวงศ์, 2542) ซึ่งทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการจัดการกับตะกอนรวม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการในการชุบโลหะโดยไม่มีน้ำทิ้งและตะกอน โดยการแยกและรวบรวมน้ำทิ้งในแต่ละขั้นตอนของการชุบโลหะ ดังภาพที่ 2.1 จากนั้นแยกปรับให้เป็นกลางและรวบรวมตะกอนที่แยกตามชนิดของโลหะ เมื่อละลายตะกอนด้วยกรดสามารถใช้เป็นสารละลายสำหรับชุบโลหะ แต่เมื่อใช้ซ้ำหลายครั้ง เหล็กจะละลายหลุดออกจากวัสดุเกิดการสะสม ทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงศึกษาการนำมูลโคและถ่านมูลโค ใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบำบัดอีกทางเลือกหนึ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีในการตกตะกอน



ภาพที่ 2.1 แผนผังการแยกน้ำเสียแต่ละประเภทตามขั้นตอนการชุบโลหะทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม

โดยความเข้มข้นของสารละลายทองแดงสังเคราะห์ ที่ใช้ในการทดลองนั้นพิจารณาจากค่าคุณลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการชุบจริง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม ก่อนเข้าระบบบำบัด

รายการ	หน่วย	ปริมาณ
ปริมาณน้ำเสีย	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	2.6
ปริมาณโลหะหนัก		
-นิกเกิล (Nickel)	มิลลิกรัมต่อลิตร	94.0
-โครเมียม (Chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	9.26
-ทองแดง (Copper)	มิลลิกรัมต่อลิตร	11.53
pH	-	5-6

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548

2.4 การกำจัดโลหะหนักด้วยชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักอาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้คือ กลุ่มแบคทีเรีย กลุ่มสาหร่าย กลุ่มรา – ยีสต์ และกลุ่มโพลีเมอร์ชีวภาพ (Henry and Brierley, 1990)

2.4.1 การกำจัดโลหะหนักของสารชีวมวลกลุ่มแบคทีเรีย

กลไกการการดูดซับโลหะหนักของแบคทีเรีย มีอย่างน้อย 3 กลไกคือ การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอน และการเกิดสารเชิงซ้อน ในการดูดซับโลหะหนักของแบคทีเรีย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผนังเซลล์ ดังนั้นสามารถ แบ่งแบคทีเรียออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

2.4.1.1 แบคทีเรียแกรมบวก (Gram positive bacteria)

ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ

1) Polymeric network เป็นส่วนของสารที่แข็งแรงมาก และสารที่ยึดหยุ่นได้ เช่น เปปติโดไกลแคน (peptidoglycan) มีรูปร่างเป็นเส้นใยตรงมีพันธะโควาเลนต์ กับเส้นใยอื่นๆ เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่เรียกว่า murein sacculas

2) Secondary polymer เป็นส่วนที่เป็นเปปติโดไกลแคนที่ยาวกว่าและมีความยืดหยุ่นกว่าส่วนแรก นอกจากนี้ยังมีกรดไทโคอิก (Teichoic) มีลักษณะเป็นโพลีเมอร์ที่เป็น

เส้นตรงของกลีเซอรอลฟอสเฟต (glycerol phosphate) และสามารถซึมผ่านช่องว่างในโมเลกุลของ Nureinframe work ผนังเซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะมีประจุลบเนื่องจากมีกรดไทโคอิก (Tichoic) และ กรดไทคูโรนิก (Trichuronic) ติดอยู่ที่โครงข่ายของเปปทิโดไกลแคน ซึ่งฟอสโฟไดเอสเทอร์ของกรดไทคูโรนิก และ หมู่คาร์บอซิลิกของกรดไทคูโรนิกมีส่วนสำคัญในการดูดซับโลหะ (Terry, 1986)

2.4.1.2 แบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria)

ผนังเซลล์ประกอบด้วยชั้นบางๆ ของเปปทิโดไกลแคนประมาณ 1 ใน 3 ของขนาดโมเลกุล และมีชั้น Lipid bilayer เรียกว่า เนื้อเยื่อชั้นนอก (อยู่ด้านบนสุดของพื้นผิวโดยมีการเชื่อมถึงกันทางเคมีกับเปปทิโดไกลแคน โดยโพลีเปปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ) ลิโปโปรตีน (Lipoprotein) เยื่อชั้นนอกซึ่งทำเป็นผนังอย่างชัดเจน ประกอบด้วย Eubacterial lipid, lipopoly-saccharide อยู่ที่ Upper leaflet และ ฟอสโฟลิปิด อยู่ที่ด้าน Lower leaflet ส่วน โปรตีนมีเพียง 2 – 3 ชนิดที่พบในปริมาณมาก

จากลักษณะดังกล่าวของเซลล์แบคทีเรียทำให้สามารถดูดซับโลหะได้ (Sampedo et al, 1995) ศึกษาการดูดซับโลหะ เหล็ก โคโรเมียม ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โดยใช้เชื้อ Phormidium laminosum ที่อยู่ในสภาพแห้งและปรับสภาพด้วย 0.1 โมล ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ พบว่าการดูดซับเกิดได้ดีที่ค่าพีเอช 6 – 7 การดูดซับสอดคล้องกับโมเดล Langmuir นอกจากนี้ยังได้กระทำการชะล้างด้วย 0.1 โมล กรดซัลฟูริกซึ่งผลจากการ Desorption ให้ผลแตกต่างกันขึ้นกับชนิดโลหะ

2.4.2 การกำจัดโลหะหนักของสารชีวมวลกลุ่มราและยีสต์

ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของราและยีสต์ที่ไม่มีชีวิตมีมากกว่ารูปที่มีชีวิต โดยการจับโลหะหนักของกลุ่ม มี 2 ขั้นตอน (Volesky and Holan, 1995)

2.4.2.1 โลหะเกาะที่ผิวของผนังเซลล์เรียกว่า Surface uptake หรือ Metabolism independent เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วใช้เวลาไม่มากนัก การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับหมู่คาร์บอซิลเอไมด์ ไฮดรอกซิล ฟอสเฟตและซัลไฟด์ และในแต่ละกลไกแสดงออกมาให้เห็นได้ยาก กลไกของแต่ละตัวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆ อย่าง เช่น สายพันธุ์ รูปแบบของเซลล์ เป็นต้น แต่สามารถอธิบายอย่างกว้างๆ ได้ ดังนี้

1) การมีกลุ่มของประจุลบที่สามารถจับโลหะได้ คือ กรดกลูคูโรนิก ในรูป Linear, (1 - 4) linked β -D-glucuronans และ ฟอสเฟต ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของผนังเซลล์

2) การมี Cis – oriented hydroxyl group ใน α - D – Mannans ซึ่งสามารถที่จะก่อรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับพวกโลหะ (Chelate complexes)

3) การมีหมู่ SH จำนวนมากในกลุ่ม ด้วยระดับของไซโตโครม P450 ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่ไฮดรอกซิล เป็นผลให้เกิดพันธะระหว่างตะกั่วกับหมู่ SH แข็งแรงมาก

4) P-toluenesulfonic acid ถูกใช้ในกระบวนการของ Microbial hydroxylation ของ steroid เมื่อมารวมตัวกันจะแสดงคุณสมบัติการดูดซับโลหะ

5) ไคตินและกลูแคน (Chitin and glucan) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างของโพลีแซคคาไรด์ในรา เป็นไปได้ว่าการดูดซับโลหะโดยสารประกอบนี้อาจเนื่องมาจากทั้งหมู่อะซิโอมิโดของไคติน และการจับโลหะ Inter and intra fibrillar capillarities

2.4.2.2 โลหะจะถูกนำผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของกลุ่ม เข้าไปในเซลล์เรียกว่า Intercellular uptake หรือ Metabolism dependent ขั้นตอนนี้ต้องใช้พลังงาน ซึ่งกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เกิดได้ช้ากว่าแบบแรก และกลไกที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ยังไม่ชัดเจน

2.4.3 การกำจัดโลหะหนักของสารชีวมวลกลุ่มวัสดุโพลีเมอร์ชีวภาพ

วัสดุกลุ่มโพลีเมอร์ชีวภาพมีอยู่มากมาย เช่น โพลีแซคคาไรด์ ไคติน เซลลูโลส แป้ง เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติในการกำจัดโลหะในรูปของ Chelating resin การจับโลหะหนักด้วยวัสดุโพลีเมอร์ชีวภาพประกอบด้วย 2 กลไกหลัก คือ Ion exchange และ Coordination compound (การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน)

โครงสร้างของโพลีเมอร์ชีวภาพที่ซับซ้อนทำให้กลไกทั้งสองเกิดพร้อมกันกลุ่ม Cation binding ionization ของโพลีเมอร์ชีวภาพเป็นกลุ่มที่มีบทบาทต่อการแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ คาร์บอกซิล (Carboxyl) อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) และอินทรีย์ซัลเฟต (Organic sulphate) กลุ่มคาร์บอกซิลิกเป็นกลุ่มที่พบมากที่สุด ในโพลีเมอร์ชีวภาพ โดยพบมากใน Side chain ของโปรตีน เช่น ยูโรมิก (Muramic) จากนั้นยังพบในโมโนแซคคาไรด์ของโพลีแซคคาไรด์

2.4.4 การกำจัดโลหะหนักของสารชีวมวลกลุ่มสาหร่าย

กลไกการดูดซับของสาหร่ายคล้ายกับการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินและความสามารถในการจับโลหะหนักเกี่ยวข้องกับหมู่คาร์บอกซิลิกเอไมด์ (Amide) อะมิดาซอล (Amidasol) ซัลเฟตไฮดรอกซิล และหมู่อื่นๆ ดังนั้นสามารถแบ่งสาหร่ายออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามโครงสร้างของเซลล์คือ

2.4.4.1 Procaryotic organism สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae, Cyanobacteria) เป็นสาหร่ายที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส และออร์แกเนลล์ผนังเซลล์มีองค์ประกอบของกรดไดอะมิโนไพมิลิก (Diaminopymilic acid) กรดมูรามิก (Muramic acid) กลูโคเอไมด์

(n-glucoamide) ส่วนที่ขึ้นนอกของผนังเซลล์มีองค์ประกอบของกรดเพคติก (Pecticacid) และมิวโคโพลีแซคคาไรด์ (Mucopolysacharide)

2.4.4.2 Eucaryotic organism เป็นสาหร่ายที่เชื้อหุ้มนิวเคลียสและออร์แกเนลล์ สามารถจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้แก่ Chlorophyta (สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเหลือง) Rhodophyta (สาหร่ายสีแดง) เป็นต้น สาหร่ายสีน้ำตาลเป็นกลุ่มที่สามารถจับไอออนของโลหะได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของโพลี-แซคคาไรด์ซึ่งลักษณะของการกำจัดโลหะหนักมี 2 แบบ คือ (Crist et al., 1992)

1) แบบรวดเร็วใช้เวลาน้อยกว่า 4 วินาที เป็นปฏิกิริยาดูดซับที่ผิวและมีการเปลี่ยนไอออนของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) และกรดยูโรนิก (Uronic acid)

2) แบบช้า ใช้เวลามากกว่า 4 วินาที เป็นการแพร่ของไอออนเข้าไปในผนังเซลล์สำหรับการเปรียบเทียบความสามารถและปัจจัยการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดงด้วยวัสดุชนิดต่างๆ กัน ไว้ในตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบความสามารถและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดง

ชนิดตัวดูดซับ	ความสามารถของการดูดซับที่อุณหภูมิ 30° C (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)	สภาวะที่เหมาะสม	ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
แกลบ	14.8	เวลา 120 นาที	- เวลาเกิน 120 นาที ทำให้โลหะหลุดจากตัวดูดซับ - ปริมาณและชนิดของโลหะที่อยู่รวมในระบบดูดซับ	Said, O.B., Shalmor, M.B. and Egila, J.N., 1993
เปลือกกล้วย	0.36	พีเอช 4.5 เข้าสู่สมดุล 20 นาที	พีเอชเพิ่มขึ้นการดูดซับเพิ่ม	Low, K.S., Lee, C.K. and Leo, A.C., 1994

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบความสามารถและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดง (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	ความสามารถของการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 °C (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)	สภาวะที่เหมาะสม	ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
ถ่านหิน	1.62 (20 °C)	พีเอช 4.0 เข้าสู่สมดุล 20 นาที	พีเอชเพิ่มขึ้น การดูดซับเพิ่ม	Solmaz, K., Abdulkerim, K., Adil, D. and Yada, Y., 2000
Soluble starch xanthate	4.63	พีเอช 4.0-5.0 เข้าสู่สมดุล 15 นาที	ดูดซับทางกายภาพ	Tare, V., Chaudhari, S. and Jawed, M., 1993
Insoluble starch xanthate	19.70	พีเอช 4.0-5.0 เข้าสู่สมดุล 15 นาที	ดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ	Tare, V., Chaudhari, S. and Jawed, M., 1993
ซีเถ้าลอย ขานอ้อย	2.30	พีเอช 4.0 เข้าสู่สมดุล 60 นาที	- พีเอชเพิ่มขึ้น การดูดซับเพิ่ม - อุณหภูมิเพิ่ม การดูดซับเพิ่ม - การดูดซับทางเคมี	Gupta, V.K. and Ali, I., 2000
Sago waste	12.40 (25±5 °C)	พีเอช 5.0 เข้าสู่สมดุล 30-40 นาที	- พีเอชเพิ่มขึ้น การดูดซับเพิ่ม - ปริมาณเพิ่ม การดูดซับเพิ่ม	Quek, S.Y., Wase, D.A.J. and Forster, C.F., 1998

2.5 ทฤษฎีการดูดซับหรือการดูดติดผิว (เอกชัย ประสาทมงคล, 2546)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ในการที่โมเลกุลของไหลเวียนคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของไหลนั้น สารของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า Adsorbent ส่วน โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า Adsorbate การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับ สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผล 3 ประการ คือ

1) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับ อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่น van der Waals force หรือ ด้วยแรงเคมี (Chemical adsorption) หรือทั้ง 2 อย่างรวมกัน

2) ความสามารถในการดูดซับ (Adsorb ability) เนื่องจากสารดูดซับมีพื้นผิวเป็นรูพรุน (Capillary tube) จึงเกิดภาวะของ Capillary action ทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายเกาะติดอยู่ได้

3) สารดูดซับมีประจุบนพื้นผิว (Surface charge) สามารถดูดซับกับวัตถุอื่นๆ ที่มีประจุตรงกันข้าม ทำให้เกิดการเกาะติดกันได้ สภาพดังกล่าวนี้คล้ายกับปรากฏการณ์ของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange mechanism)

2.5.1 ลักษณะหรือรูปแบบของการดูดซับที่เกิดขึ้นอาจแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) ดังนี้

2.5.1.1 การดูดซับแบบกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดติดด้วยแรงประเภท van der Waals หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีลักษณะเป็นแรงอ่อนไม่ยึดติดแน่น และ ยังพบว่าไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ง่าย และการดูดซับอาจเกิดขึ้นกันได้เป็นหลายชั้น (Multilayer) มักจะเหมาะสมกับสถานะอุณหภูมิต่ำ

2.5.1.2 การดูดซับแบบเคมี (Chemical adsorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวถูกละลายทำปฏิกิริยาเคมีกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกละลายเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่ โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับทำให้ยากและการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับอยู่ระหว่าง 50 ถึง 400 kJ/mol ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนที่ได้จากกลั่นตัวของแก๊ส เป็นของเหลว (Heat of liquefaction)
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง	แรงดึงดูดของสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอ่อน

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ (ต่อ)

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ส่วนใหญ่ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในการเกิดกระบวนการ
ส่วนใหญ่ไม่เกิดการผันกลับ	ส่วนใหญ่เกิดการผันกลับได้
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียวแต่อาจจะเกิดการดูดซับทางกายภาพบนชั้นที่เกิดการดูดซับทางเคมีแล้ว	เกิดการดูดซับได้หลายชั้น
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

2.5.1.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) บริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงข้ามกัน

2.5.1.4 การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป พฤติกรรมการดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับแบบกายภาพและแบบเคมี

2.5.2 ขั้นตอนการดูดซับหรือการดูดติดผิว อาจแบ่งได้เป็น 4 ช่วง (Vladimir et al., 1974)

2.5.2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าหาสารดูดติดผิว โดยการเคลื่อนที่ อาจเกิดเนื่องจากการกวนน้ำจนทำให้เกิดการปั่นป่วน หรือเนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน การเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ ที่มีกลไกเช่นเดียวกับที่เกิดในเครื่องกรองน้ำ

2.5.2.2 Film diffusion เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงสารดูดติดผิว ซึ่งมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มน้ำให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวของสารดูดติดผิวได้

2.5.2.3 Pore diffusion เนื่องจากสารดูดติดผิวมีลักษณะของพื้นที่ผิวเป็นโพรงหรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวถูกละลายจึงต้องแทรกตัวเข้าไปถึงช่องว่างภายในสารดูดติดผิว จึงจะมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น

2.5.2.4 โมเลกุลต้องเกาะติดบนผิวของสารดูดติดผิวโดยไม่หลุด

2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สบนผิวของแข็งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับกับความดันของแก๊สที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ส่วนกรณีการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารในสารละลายที่ถูกดูดซับในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลายอาจคำนวณได้จากมวลสมดุล (Mass balance)

พิจารณาที่สภาวะสมดุลได้สมการ ดังนี้

$$q = \frac{(C_i - C_e) \times V}{m} \quad (2.1)$$

เมื่อ	q	= ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับหนัก 1 กรัม
	C_i	= เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_e	= เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	V	= เป็นปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
	m	= เป็นมวลของสารดูดซับ (กรัม)

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ ได้แก่ Langmuir, Brunauer–Emmett–Teller (BET) และ Freundlich ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.6.1 สมการของแลงเมียร์ (Langmuir, 1918) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 เป็นสมการที่เสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว มีสมมุติฐานดังนี้ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับ (adsorption sites) ที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับ จะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว ดังสมการ 2.2

$$q = q_m \frac{C_e}{b + C_e} \quad (2.2)$$

- เมื่อ C_e = ความเข้มข้นสุดท้ายหลังการดูดซับที่จุดสมดุล
(มิลลิกรัมต่อลิตร)
- q = ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(มิลลิกรัมต่อกรัม)
- q_m = ค่าการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- b = ค่าคงที่การดูดซับ (Adsorption affinity)

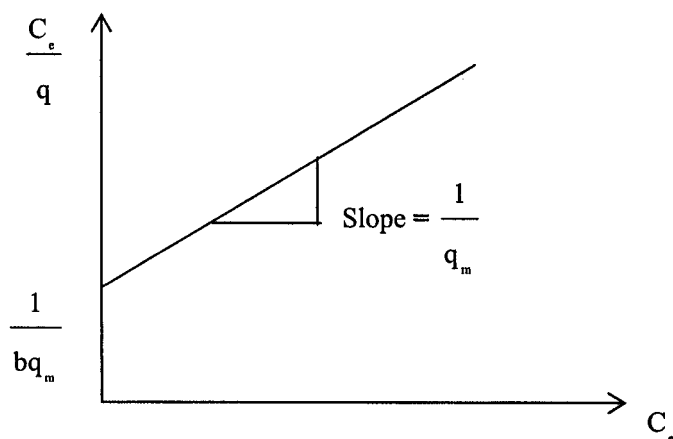
เพื่อให้สามารถหาค่า q_m และ b ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงต้องจัดรูปแบบสมการใหม่ให้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{bq_m} \times \frac{1}{C_e} \quad (2.3)$$

$$\frac{C_e}{q} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{bq_m} \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน $\frac{1}{bq_m}$ และมีความชันเท่ากับ

$\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กราฟสำหรับสมการ (2.4) ของ Langmuir

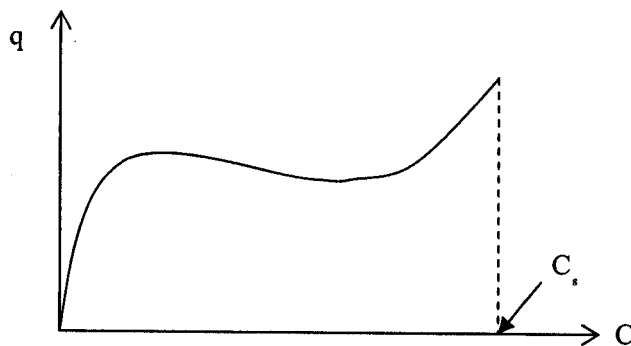
2.6.2 สมการบีอีที (BET) ของ Brunauer – Emmett – Teller (Suzuki, 1990) ใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้นมีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิวและการดูดซับ มีระดับคงที่สำหรับทุกๆ โมเลกุลในแต่ละชั้นของการดูดซับ ดังแสดงในสมการ

$$q = \frac{q_m K_b C}{(C_s - C)[1 + (K_b - 1)(C/C_s)]} \quad (2.5)$$

เมื่อ C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุก ๆ ชั้น
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_b = ค่าคงที่ของการดูดซับ

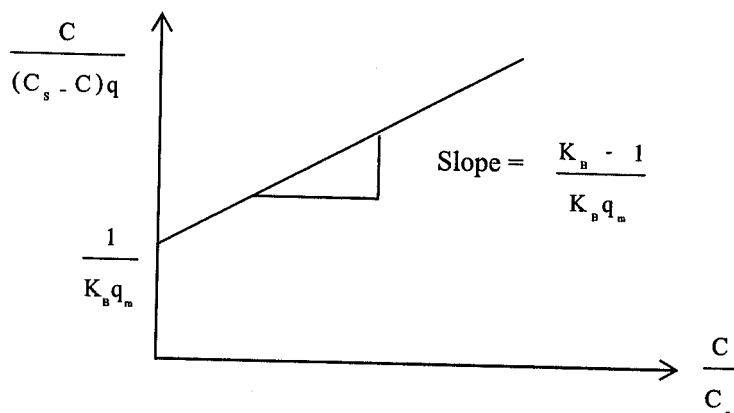
สำหรับค่า C_s สามารถหาได้จากการเขียนกราฟระหว่าง q และ C ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กราฟหาค่า C_s สำหรับสมการ (2.5) ของ BET

เพื่อให้สามารถหาค่า K_b และ q_m ได้ด้วยวิธีเขียนกราฟ จึงต้องจัดรูปสมการให้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{C}{(C_s - C)q} = \frac{1}{K_b q_m} + \frac{K_b - 1}{K_b q_m} \times \frac{C}{C_s} \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.4 กราฟสำหรับสมการ (2.6) ของ BET

2.6.3 สมการฟรุนลิช (Freundlich, 1906) เป็นสมการที่ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นที่ผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว ซึ่งฟรุนลิชได้เสนอความสัมพันธ์สมมูลของการดูดซับตามสมการที่ 2.7 ดังนี้

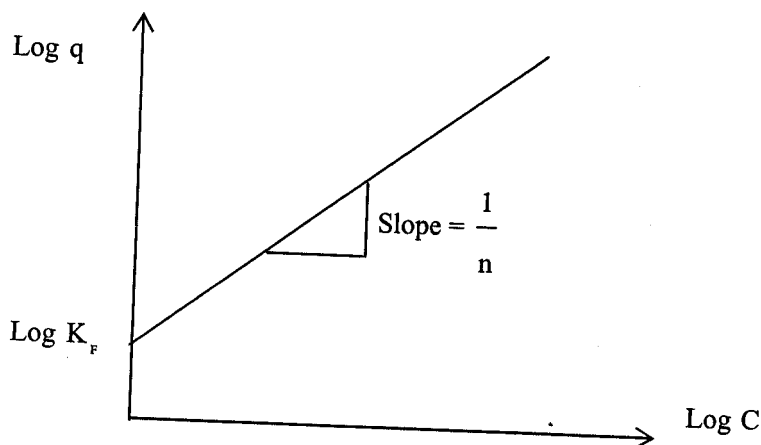
$$q = K_F C^{1/n} \quad (2.7)$$

เมื่อ K_F = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ
 $1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา

เพื่อให้สามารถหาค่า K_F และ n ได้ด้วยวิธีเขียนกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปสมการใหม่ ให้เป็นสมการดังนี้

$$\text{Log}(q) = \text{Log}(K_F) + 1/n \text{ Log}(C) \quad (2.8)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\text{Log } q$ กับ $\text{Log } C$ จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน คือ $\text{Log } K_F$ และความชันเท่ากับ $1/n$ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 กราฟสำหรับสมการ (2.8) ของ Freundlich

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2.7.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area)

เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนอัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ แต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยขั้นตอนการขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) ดังนั้น อัตราการดูดติดผิวจึงเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับและในทางตรงข้ามถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ

2.7.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Nature of adsorbate)

การดูดติดผิวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในกระบวนการดูดติดผิวถูกดูดซับ หรือตัวถูกละลายจะถูกดึงออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ ถ้าอัตราการดูดติดผิวถูกควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรง ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลาย ยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย และขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว

2.7.3 พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดติดผิวด้วยนอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนก็เป็นไอออนที่

สามารถดูดติดผิวได้อย่างดี โดยทั่วไปแล้วการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง เป็นการดูดติดผิวของสารละลาย Alkylbenzene sulfonate (ABS) ในการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารละลายที่มีพีเอชเป็นกลางเข้าสู่ระบบ จนกระทั่งอัตราส่วนของสารในน้ำเข้า และน้ำออกเท่ากับ 0.55 และทำการปรับสารละลายให้มีพีเอชเป็น 2.5 ผลจากการลดค่าพีเอช ทำให้การดูดติดผิวเพิ่มขึ้น และลดความเข้มข้นของสารละลายลงอย่างรวดเร็ว

2.7.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทั้งนี้ เพราะการดูดติดผิวเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic)

2.7.5 ความปั่นป่วน (Mixing speed)

อัตราดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับขั้นตอนการขนส่งผ่านฟิล์ม (Film transport) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งในระบบที่มีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และก่อให้เกิดอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film transport เป็นตัวควบคุมการดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนเข้าสู่สารดูดติดผิวได้เร็วขึ้น ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิว

2.7.6 เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสในกระบวนการดูดติดผิวเป็นพารามิเตอร์สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง เพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าการดูดติดผิวของสารแปลกปลอมในน้ำเป็นไปอย่างเหมาะสม สารละลายควรจะมีเวลาเก็บกักในชั้นของคาร์บอนนานประมาณ 30 นาที (Cheremisinoff, 1976)

2.8 มูลโค

มูลโคเป็นสิ่งปฏิกูลที่โคขับถ่ายออกมาในแต่ละวันขับถ่ายออกมาถึง 19 กิโลกรัม/ตัว/วัน ในประเทศไทยมีการเลี้ยงโคทั่วประเทศ 5,571,283 ตัว (ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กองแผนงาน กรมปศุสัตว์, 2546) ดังนั้นในแต่ละวันจะมีมูลโคประมาณ 1 แสนตัน ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก โดยทั่วไปมีการนำมูลโค ไปใช้ประโยชน์อยู่หลายทาง เช่น การนำไปทำปุ๋ยหมัก, ทำก๊าซชีวภาพการนำไปทำหัวเชื้อ (Seeding) ในระบบบำบัดน้ำเสีย, เชื้อเพลิงอัดแท่ง และในประเทศญี่ปุ่นนำของเสียต่างๆ อาทิ

เช่น อุจจาระคน มูลโค กำจัดและรีไซเคิล โดยการไพโรไลซิส เพื่อลดปริมาณของเสียภายใต้โครงการ Zero emission (Yoshiyuki and Yutaka, 2003) เหล่านี้ล้วนเป็นข้อดีของการนำมูลโคไปใช้ประโยชน์ ส่วนองค์ประกอบของมูลโคประกอบด้วย ในโตรเจน 0.6%, ฟอสฟอรัส 0.3%, โพแทสเซียม 0.7%, คิดจากน้ำหนักแห้ง 25%, (นิรันดร์ โพธิกานนท์, 2546), เชลลูโลส และลิกนินที่โคกินหญ้าแล้วย่อยไม่หมด เป็นต้น

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้มุ่งเน้นมูลโคที่เลี้ยงแบบปล่อยในทุ่งหญ้า เนื่องจากโคชนิดนี้จะกินหญ้าเป็นอาหารอย่างเดียว ซึ่งจะกล่าวถึงแบบและวิธีการเลี้ยงโค ดังนี้

2.8.1 แบบและวิธีการเลี้ยงโค

แบบวิธีการเลี้ยงโคที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน จำแนกออกได้เป็น 3 แบบ ใหญ่ๆ ดังนี้

2.8.1.1 เลี้ยงแบบปล่อยในทุ่งหญ้า

วิธีการนี้โคจะถูกปล่อยให้หากินเองในทุ่งหญ้าเกือบตลอดเวลา จะนำเข้าโรงเฉพาในเวลาพักผ่อน ฤดูฝนและในเวลากลางคืนเท่านั้น และถ้าฝนฟ้าอากาศอำนวยไม่มีศัตรูรบกวนอาจปล่อยไว้ในแปลงตลอดคืน

2.8.1.2 การเลี้ยงแบบปล่อยในลาน

เป็นการเลี้ยงที่ปล่อยให้โค อย่างอิสระแต่จำกัดอาณาเขตให้อยู่ในบริเวณที่กำหนด การเลี้ยงตามวิธีนี้ผู้เลี้ยงต้องนำทั้งหญ้าและอาหารขึ้นมาเลี้ยงถึงในคอก

2.8.1.3 การเลี้ยงแบบขังโรง

เป็นการเลี้ยงโดยที่โคจะถูกล่ำนหรือใช้ประกันคอก (Stanchion) เรียงเป็นแถว และให้โคอยู่กับที่ตลอดเวลาและถ้าหากมีโคเป็นจำนวนมากก็อาจให้มาขึ้นเรียงเป็นสองแถว โดยหันหน้าเข้าหากัน หรืออาจจะหันหลังให้กัน การเลี้ยงโคแบบนี้ผู้เลี้ยงต้องนำหญ้า อาหาร มาให้โค กินถึงทุกตัวไป

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การวิจัยมูลโคส่วนใหญ่จะมุ่งเน้น และวิเคราะห์หาองค์ประกอบมูลโคที่เกี่ยวข้องเฉพาะค่าที่ให้ผลต่อการทำปุ๋ย และการหมักทำก๊าซชีวภาพ ซึ่งปริมาณเชลลูโลสและลิกนินนั้น ยังไม่มีงานวิจัยใด วิเคราะห์หาสัดส่วน และปริมาณของเชลลูโลสและลิกนิน แต่มูลโคที่สกัดท้ายแล้วจะต้องมี เชลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากโคกินหญ้าเป็นอาหารหลักโดยเฉพาะโคที่เลี้ยงแบบปล่อยในทุ่งหญ้า และหญ้าที่กินเข้าไปมีบางส่วนย่อยไม่หมด เมื่อขับถ่ายออกมาทำให้มีเชลลูโลสและลิกนินปะปนอยู่ในมูลโคได้ แต่อย่างไรก็ตามมูลโคยังมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก และหากจัดกลุ่มของมูลโคในการกำจัดโลหะหนักโดยสารชีวมวล จะจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุโพลีเมอร์ชีวภาพ ซึ่งกล่าวในหัวข้อที่ 2.4.3 ซึ่งจะนำเสนอถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทองแดงในรายงานการศึกษาฉบับนี้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการทดลอง

3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.1.1.1 การเตรียมมูลโค

นำมูลโคตากให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วบดให้มีขนาดเล็กลง โดยนำไปร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 600 ไมครอน เพื่อเป็นการคัดขนาดของมูลโคให้มีขนาดเท่าๆ กัน บรรจุใส่ภาชนะพร้อมนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.1.1.2 การเตรียมถ่านมูลโค

สามารถกระทำได้โดยนำมูลโคที่ผ่านขั้นตอนการ อบ บด ร่อนแล้ว นำไปใส่ในถ้วยครุชีเบลล์ห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งถ่านมีพีเอช 7 ทั้งนี้ ถ่านมีคุณสมบัติเป็นด่าง เป็นการป้องกันการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ แล้วอบให้แห้ง บรรจุใส่ภาชนะพร้อมนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.1.1.3 การเตรียมสารละลายทองแดงสังเคราะห์

ชั่ง $\text{Cu}(\text{SO}_4)_5\text{H}_2\text{O}$ 0.3929 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ทั้งนี้เป็นการป้องกันการตกตะกอนของโลหะทองแดงในระหว่างทำการทดลอง ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออนซึ่งสารละลายนี้มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเจือจางจากสารละลาย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.2 การศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มการดูดซับ

นำมูลโคปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 กรัม เติมลงในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชให้เท่ากับ 2 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 วัดหาความเข้มข้นของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์หาค่าปริมาณที่เหมาะสมของการดูดซับ และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับเพื่อเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดลิช (Freundlich)

3.1.3 การศึกษาหาเวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ

มูลโคที่ได้จากการหาปริมาณที่เหมาะสม เติมลงในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 500 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที โดยปรับพีเอชด้วย สารละลาย NaOH ให้เท่ากับ 2, 4, 6 ตามลำดับ (โดยทำที่ละพีเอช) ดูดเอาสารละลายตัวอย่างด้วย กระบอกฉีดยา เมื่อระยะเวลาดูดซับผ่านไป 5, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที กรองผ่านกระดาษ กรองเบอร์ 1 วัดหาความเข้มข้นของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง AAS ส่วนถ่านมูลโคทำเช่น เดียวกัน

ทำการทดลองควบคุมเพื่อหาปริมาณตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอช 2, 4, และ 6 โดยนำสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ เริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 2, 4, และ 6 ตามลำดับ นำไปวัดหาความเข้มข้นของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง AAS

3.1.4 การศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดงหลังการใช้มูลโคและถ่านมูลโคในการดูดซับ

นำสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์หลังการดูดซับด้วยมูลโคและถ่านมูลโค (จากข้อ 3.1.3) วิเคราะห์หาค่า BOD และ COD เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์

3.1.5 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์

เตรียมสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อการดูดซับ ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เหมาะสมที่ค่าที่ได้จาก ข้อ 3.1.3 จากนั้น แบ่งสารละลายออกเป็น 2 ส่วน ในปริมาณเท่ากัน ส่วนแรกนำไปเติมถ่านมูลโค 1 กรัม เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ณ เวลาดูดซับ 30 นาที วัดหาความเข้มข้นของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง AAS และทำการทดลองควบคุมโดยนำสารละลาย ส่วนที่เหลือไปวัดหาความเข้มข้นของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง AAS โดยไม่ต้องเติมถ่าน มูลโคลงไป

3.1.6 การศึกษาจุลโครงสร้างของตัวดูดซับ

3.1.6.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเครื่อง BET Surface areas analyzer โดยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K โดยมีขั้นตอนคือ ชั่งมูลโคใส่ลงใน Port ไล่ความชื้นและทำให้ระบบมีสุญญากาศ ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ประสานการทำงาน Analyzer เพื่อเป็นการเตรียมตัวอย่าง มูลโคสำหรับการวิเคราะห์ นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและการกระจายขนาด รูพรุน สำหรับถ่านมูลโคดำเนินขั้นตอนวิเคราะห์ดังกล่าวเช่นเดียวกัน

3.1.6.2 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษา
จุลโครงสร้างของมุลโคและถ่านมุลโค โดยอาศัยหลักการนำไฟฟ้าของไอออนโลหะจึงสามารถ
ถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงๆ ได้ตามต้องการ

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 เตาอบ (Hot air oven) รุ่น 1375FX ยี่ห้อ Shel leb

3.2.1.2 ตะแกรงร่อนขนาด 600 ไมครอน

3.2.1.3 เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น LC 6201S ยี่ห้อ Sartorius

3.2.1.4 เครื่องวัดพีเอช รุ่น PP25 ยี่ห้อ Sartorius

3.2.1.5 เครื่องปั่น รุ่น BE 122G ยี่ห้อ OTTO

3.2.1.6 เครื่องเขย่าสารเคมี (Shaker) รุ่น VS-8480SF

3.2.1.7 ตู้ดูดความชื้น รุ่น NALGENE

3.2.1.8 เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Perkin Elmer
รุ่น AAnalyst 200

3.2.1.9 เครื่อง BET Surface areas analyzer ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb 1-c

3.2.1.10 เครื่อง SEM ยี่ห้อ รุ่น JSM-5410

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2.1 บีกเกอร์

3.2.2.2 ขวดรูปชมพู่

3.2.2.3 ขวดวัดปริมาตร

3.2.2.4 ปีเปต

3.2.2.5 ขวด Vial ขนาด 20 มิลลิลิตร

3.2.2.6 กระดาษกรองเบอร์ 1

3.2.2.7 แท่งแก้ว

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ ได้แก่ คอปเปอร์ซัลเฟต $\text{Cu}(\text{SO}_4)5\text{H}_2\text{O}$

3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง

3.3.2.1 สารละลาย 6 M กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.3.2.2 สารละลาย 6 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.3.3 สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องแก้ว

3.3.3.1 สารละลาย 10 % กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3)

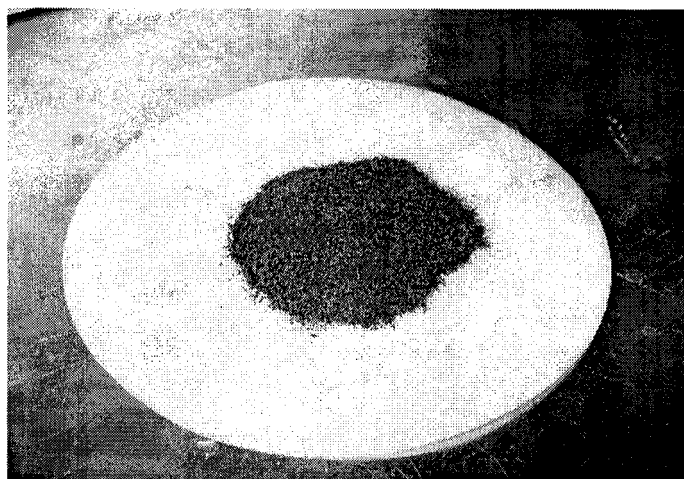
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในบทที่ 4 กล่าวถึงลักษณะทางกายภาพของมูลโคและถ่านมูลโค ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะสี ได้แก่ ปริมาณที่เหมาะสม รวมทั้งไอโซเทอร์มของการดูดซับ, ระยะเวลาและพีเอชที่เหมาะสมของการดูดซับ, ปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดง หลังการใช้มูลโคและถ่านมูลโคในการดูดซับ, ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง รวมทั้งศึกษาถึงจุลโครงสร้างของตัวดูดซับ ซึ่งจะกล่าวถึงผลของการศึกษาในรายละเอียดไว้ดังนี้

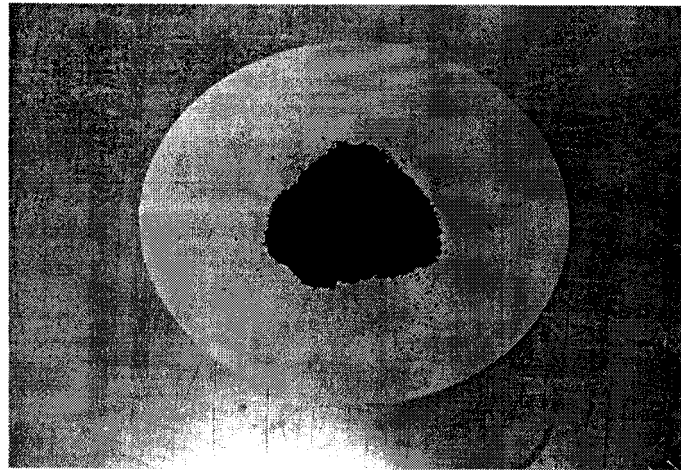
4.1 ลักษณะทางกายภาพของมูลโคและถ่านมูลโค

มูลโคเมื่อผ่านการตากแห้ง อบ บด ร่อน แล้ว มูลโคจะมีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 600 ไมครอน สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ไม่คำนึงถึงการคัดขนาด แต่ต้องการให้ขนาดของพื้นที่ผิวมูลโค ดูดซับสารละลายทองแดงสังกะสีได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน สำหรับลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของมูลโค มีสีเหลือง คล้ายปุ๋ยหมัก มีเศษฟางข้าวอยู่ประปราย ไม่มีกลิ่นเหม็น ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของมูลโค

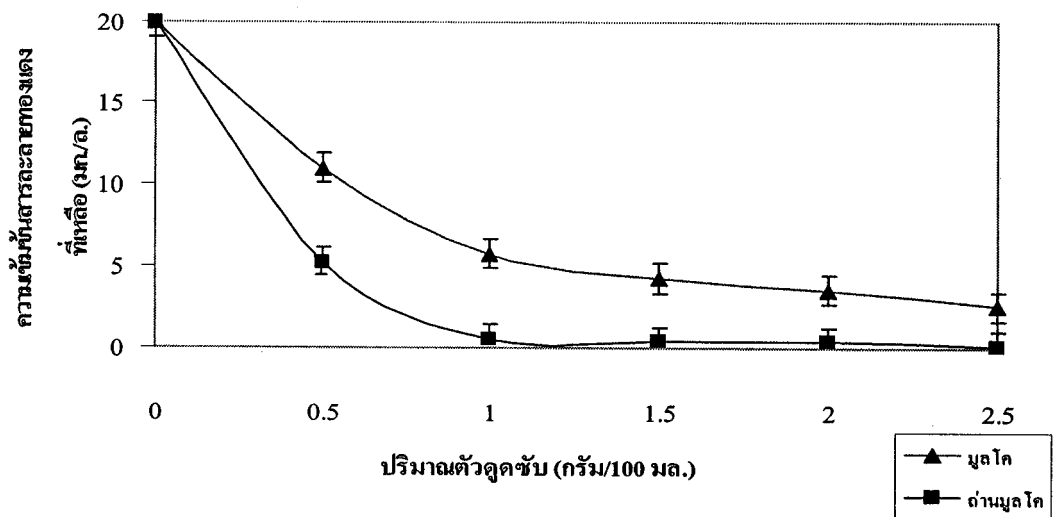
เมื่อนำมุลโคที่ผ่านการ อบ บด ร่อน แล้วเผาเพื่อทำให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของถ่านมุลโค มีสีดำ เป็นผงเนื้อค่อนข้างละเอียด ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ลักษณะของถ่านมุลโค

4.2 ปริมาณที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในมุลโคก่อนที่จะเริ่มทำการศึกษาโดยการนำมุลโคไปละลายในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวไปวัดหาทองแดงซึ่งไม่มีการตรวจพบปริมาณทองแดงแต่อย่างใด ทำการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของมุลโคและถ่านมุลโค โดยใช้ปริมาณจาก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 กรัม ต่อสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทองแดงที่เหลือกับปริมาณสารดูดซับ ทำการดูดซับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือกับปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมุลโคและถ่านมุลโค ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงที่เหลือมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามการเติมมุลโคและถ่านมุลโคในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดปัญหาในการกรองแยกสารละลายเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าทองแดง เนื่องจากมีลักษณะเป็นตะกอนขึ้น ดังนั้นจึงเลือกปริมาณ 1 กรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร เป็นปริมาณมุลโคและถ่านมุลโคที่เหมาะสมในการทำการทดลองต่อไป ซึ่งปริมาณดังกล่าวทำให้ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงที่เหลือมีค่าลดลงมาก ประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าร้อยละ 70 และ 95 ตามลำดับ

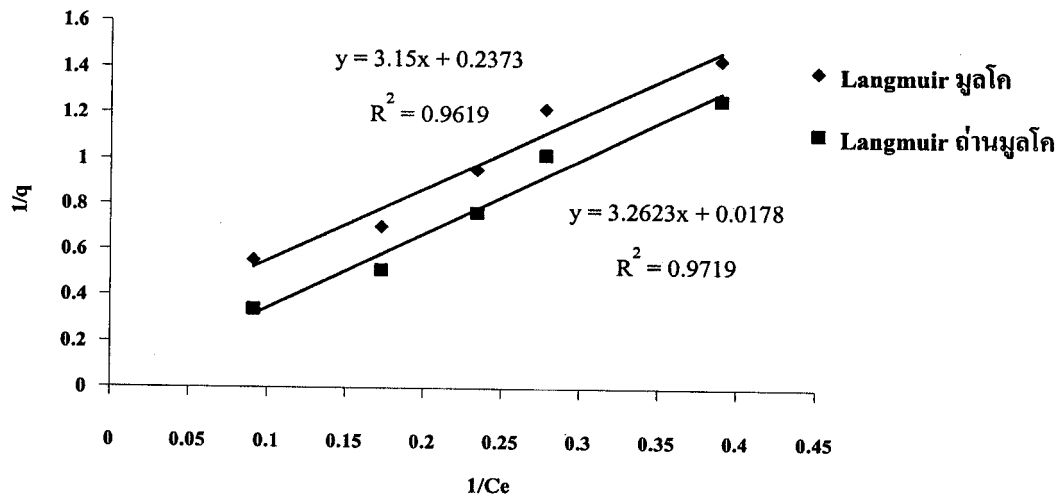
ใช้ข้อมูลจากภาพที่ 4.3 เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ และทำการทดสอบความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich) ผลการศึกษาไอโซ-เทอร์มการดูดซับ แสดงในตารางที่ 4.1

จากข้อมูลในตาราง 4.1 นำมาเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการของ Langmuir และ Freundlich แสดงดังภาพที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

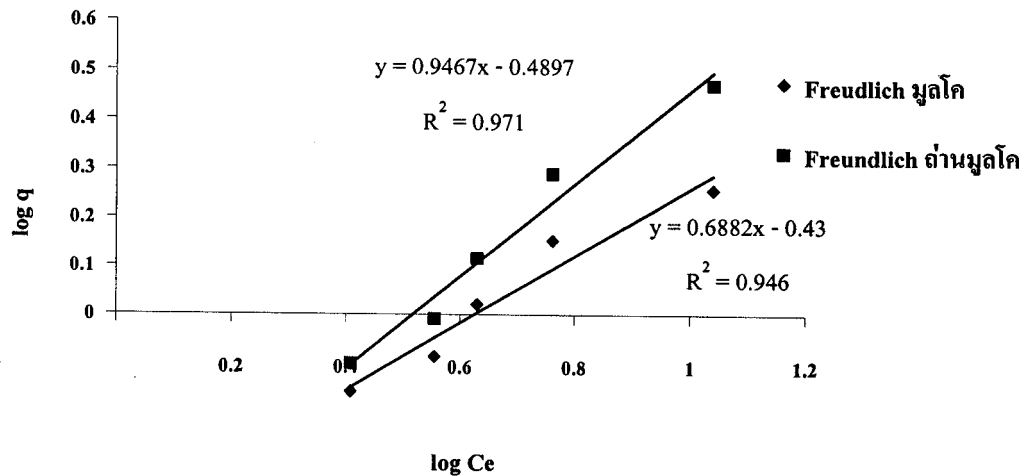
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับโดยมุลโคและถ่านมุลโค

q (มิลลิลิตร ต่อกรัม) มุลโค	Ce (มิลลิกรัม ต่อลิตร) มุลโค	q (มิลลิลิตร ต่อกรัม) ถ่าน มุลโค	Ce (มิลลิกรัม ต่อลิตร) ถ่าน มุลโค	สมการแลงเมียร์			สมการฟรุนดลิช		
				Langmuir			Freundlich		
				1/Ce มุลโค	1/q มุลโค	1/q ถ่าน มุลโค	log Ce มุลโค	log q มุลโค	log q ถ่าน มุลโค
1.804	10.98	2.952	5.237	0.091	0.554	0.338	1.0406	0.256	0.470
1.422	5.776	1.947	0.524	0.173	0.703	0.513	0.7616	0.153	0.289
1.048	4.267	1.306	0.402	0.234	0.953	0.765	0.6301	0.021	0.116
0.820	3.593	0.980	0.394	0.278	1.218	1.020	0.5554	-0.086	-0.008
0.697	2.562	0.741	0.147	0.390	1.433	1.259	0.4085	-0.156	-0.100

หมายเหตุ q คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) หาจาก
มวลสมดุล $q = V/M * (C_0 - C_e)$



ภาพที่ 4.4 ไอโซเทอรั่มการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir)



ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการฟรุนดิช (Freundlich)

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 สามารถวิเคราะห์สรุปค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ และ ฟรุนดิช ได้ดังตารางที่ 4.2

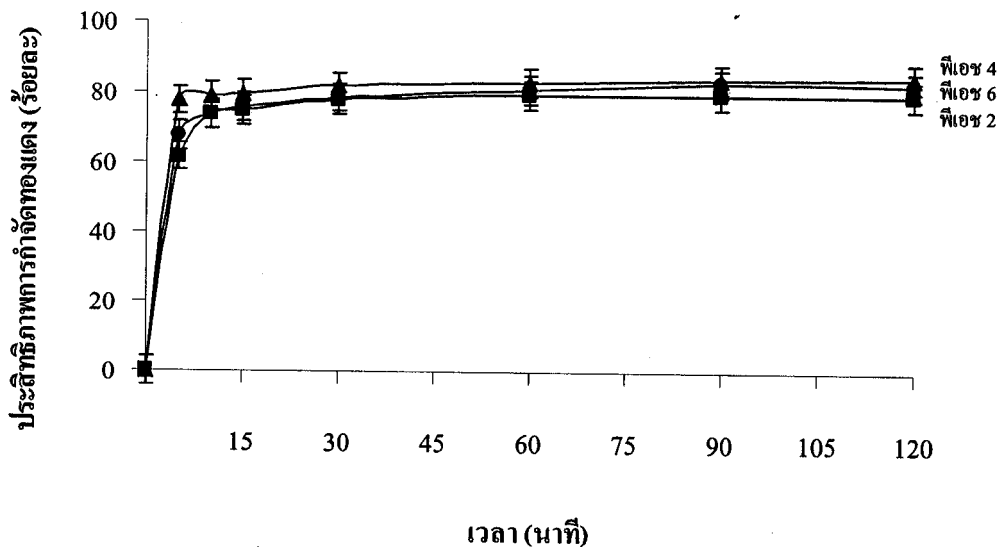
ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายทองแดงสังเคราะห์โดยมูลโคและถ่านมูลโค ตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir) และ ฟรุนดิช (Freundlich)

	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มฟรุนดิช		
	q_m (มิลลิกรัมต่อกรัม)	b	r^2	K (มิลลิกรัมต่อกรัม) (ลิตรต่อมิลลิกรัม) ^{1/n}	n	r^2
มูลโค	4.21	13.27	0.962	0.37	0.69	0.946
ถ่านมูลโค	56.18	183.27	0.972	0.32	0.95	0.971

พบว่าสมการแลงเมียร์ และ สมการฟรุนดิช สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของมูลโคและถ่านมูลโคได้ดี ($r^2 > 0.9$) โดยถ่านมูลโคมีการดูดซับทองแดงได้สูงกว่ามูลโค เนื่องจาก ถ่านมูลโคผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์พื้นที่ผิวของถ่านมูลโคจึงมีรูพรุนที่มากกว่าซึ่งจากการเกิดการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนภายในช่องว่างระหว่างผลึก อีกทั้งพื้นที่ผิวของถ่านมูลโคมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก ทำให้ความสามารถในการจับกับไอออนบวกจึงมีมากขึ้นตาม

4.3 เวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ

การศึกษาหาเวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับนั้น เลือกใช้ปริมาณมูลโคและถ่านมูลโคที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 4.2 ซึ่งได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

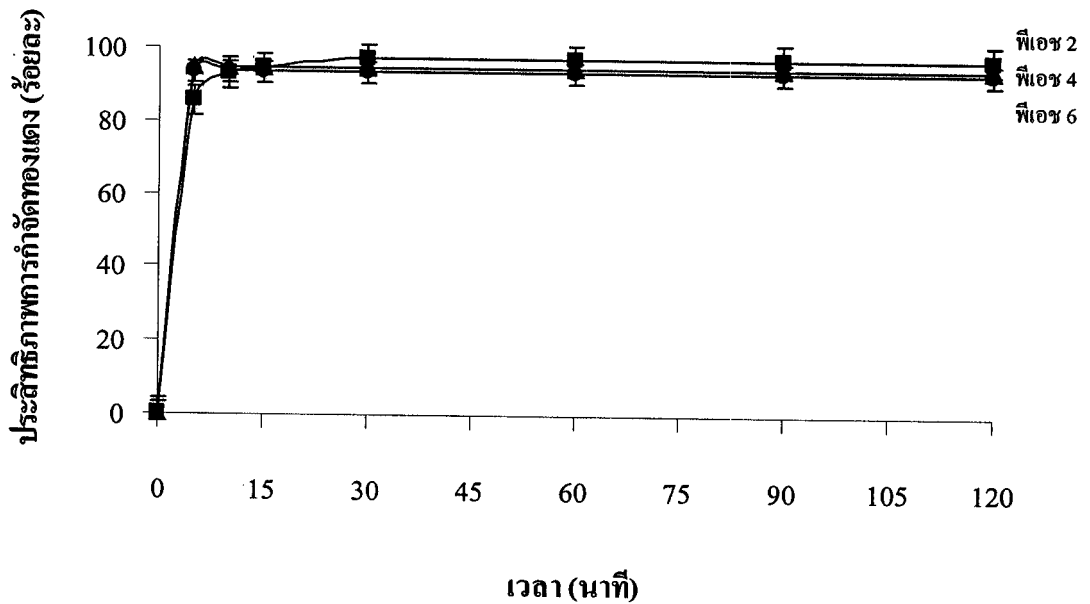


ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ) ของมูลโคที่เวลาและค่าพีเอชต่างๆ (ปริมาณมูลโคที่ใช้เท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากภาพที่ 4.6 พบว่าทุกค่าพีเอช (2, 4 และ 6) สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในช่วง 30 นาทีแรก ของมูลโคประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเริ่มมีค่าคงที่และเข้าสู่สมดุล ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายทองแดงของมูลโค คือ ประมาณ 30 นาที ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่พีเอช 2, 4 และ 6 คือ ร้อยละ 78.05, 81.86 และ 78.64 ตามลำดับ

ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับมูลโค คือ พีเอช 4 ตลอดช่วงระยะเวลาการดูดซับ ซึ่งดีกว่าที่ค่าพีเอช 2 และ 6 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ค่าพีเอช 2 มีปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) อยู่ในปริมาณที่มากกว่าที่ค่าพีเอช 4 จึงทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างไฮโดรเจนไอออน (H^+) กับคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ในการดูดซับกับผิวพื้นที่ผิวของมูลโคมีประจุลบ ทำให้ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์

ไอออน (Cu^{2+}) ลดลงและเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 6 การดูดซับระหว่างมูลโค กับ คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ในช่วง 30 นาทีแรกยังเกิดไม่สมบูรณ์ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น (Schiewer and Volesky, 1995) จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวยังไม่เสถียรในการยึดเหนี่ยวกันระหว่าง คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) กับผิวพื้นที่ผิวของมูลโค หรือคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) กับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ประสิทธิภาพการกำจัดจึงน้อยกว่าพีเอช 4



ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ) ของถ่านมูลโคที่เวลาและค่าพีเอชต่างๆ (ปริมาณมูลโคที่ใช้เท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากภาพที่ 4.7 พบว่าทุกค่าพีเอช (2, 4 และ 6) ถ่านมูลโคมีแนวโน้มเช่นเดียวกับมูลโค คือประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเริ่มมีค่าคงที่ และเข้าสู่สมดุล ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายทองแดงของถ่านมูลโค คือ ประมาณ 30 นาที เช่นเดียวกับมูลโค ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่พีเอช 2, 4 และ 6 คือ ร้อยละ 97.23, 94.90 และ 93.55 ตามลำดับ

ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับถ่านมูลโค คือ พีเอช 2 ตลอดช่วงระยะเวลาการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจาก พีเอช 4 และ พีเอช 6 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงก่อนการปรับแก้ คือ ร้อยละ 100

เมื่อปรับแก้ด้วยตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งมากขึ้นตามค่าพีเอช (ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.3) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของถ่านมุลโคลดลงตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น

ผลที่ได้จากภาพที่ 4.6 และ 4.7 มีการปรับแก้ค่าการตกตะกอนของสารละลายทองแดงที่ตกตะกอนในรูปของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ จากการทดลองควบคุม ซึ่งพบว่า ที่พีเอช 2, 4 และ 6 ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์มีค่า 0.43, 1.02 และ 1.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงสรุปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 2, 4 และ 6 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

พีเอช	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
2	19.57	0.43	2.15
4	18.98	1.02	5.10
6	18.71	1.29	6.45

4.4 ปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดงหลังการใช้มุลโคและถ่านมุลโคในการดูดซับ

เลือกใช้ค่า BOD และ COD อธิบายถึงปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์ หลังจากดูดซับของมุลโคและถ่านมุลโค แสดงสรุปผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับ (1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) ณ เวลา 120 นาที

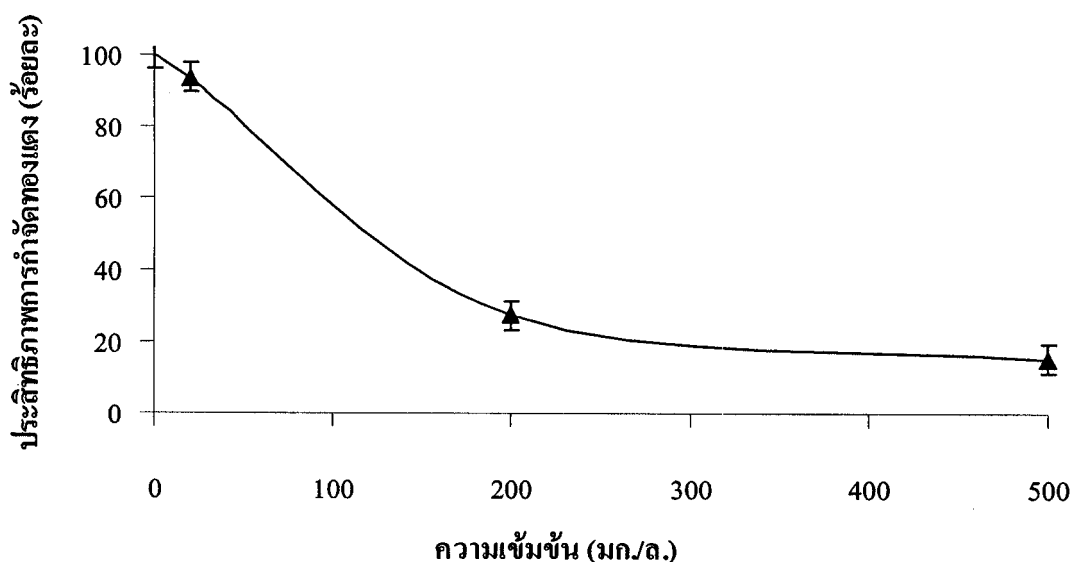
ตัวดูดซับ	BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)
มุลโค	460	612
ถ่านมุลโค	ND	ND

จากตารางที่ 4.4 พบว่ามุลโคมีค่าทั้ง 2 พารามิเตอร์สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (ดูจากภาคผนวก จ) แสดงได้ว่าสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังเคราะห์ หลังการดูดซับ

ด้วยมูลโคมีความสกปรกมาก ถือว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมูลโคมาใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ แต่ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ไม่ถูกตรวจพบในสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ หลังการดูดซับด้วยถ่านมูลโค แสดงให้เห็นว่าถ่านมูลโคมีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวดูดซับมากกว่ามูลโค

4.5 ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์

การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะระห์ ส่งผลกระทบต่อการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านมูลโค (หมายเหตุ ทำการทดลองเฉพาะถ่านมูลโค เนื่องจากมูลโคไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ ดังกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.4) โดยการเพิ่มความเข้มข้นจาก 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 4 เวลาดูดซับ 30 นาที แสดงผลการทดลองที่ได้ ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ) ของถ่านมูลโคที่ค่าพีเอช 4 (ปริมาณมูลโคที่ใช้เท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ)

จากภาพที่ 4.8 พบว่าที่ค่าพีเอช 4 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของถ่านมูลโคคือ ร้อยละ 93.73, 27.50 และ 15.20 ลดลงตามลำดับ อาจเป็นเพราะพื้นที่ผิวของถ่านมูลโคมีรูพรุนไม่เพียงพอสำหรับการดูดซับคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+})

ความสามารถในการดูดซับจึงลดลง อย่างมากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่ตกเป็นผลึกตะกอนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดอุดตันของรูพรุนในถ่านมุลโค

ผลที่ได้จากภาพที่ 4.8 มีการปรับแก้ค่าการตกตะกอนของสารละลายทองแดงที่ตกตะกอนในรูปของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ จากการทดลองควบคุม ซึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์มีค่า 1.02, 30.40 และ 73.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงสรุปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 4 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
20	0.234	1.02	93.73
200	114.60	30.4	27.50
500	350.75	73.25	15.20

4.6 จุลโครงสร้างของตัวดูดซับ

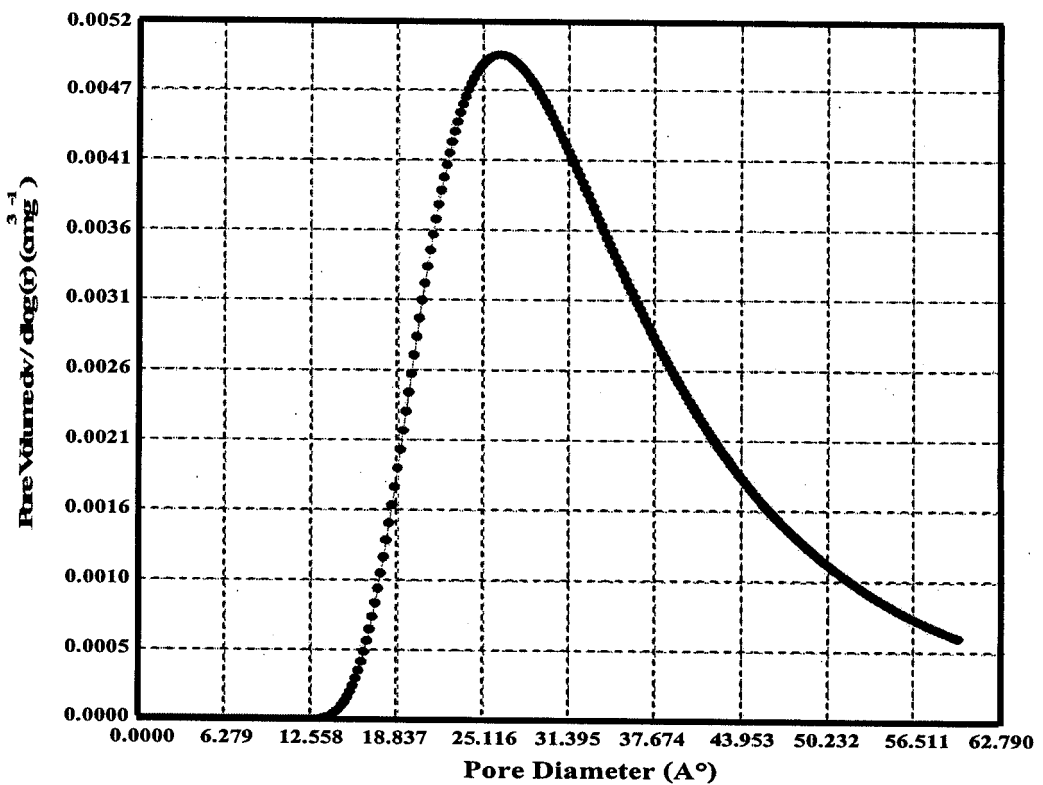
4.6.1 พื้นที่ผิวและขนาดการกระจายตัวรูพรุนของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดการกระจายตัวรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเครื่อง BET Surface Areas analyzer แสดงสรุปในตาราง ที่ 4.6 ดังนี้ (ดูรายละเอียดข้อมูลในภาคผนวก ฉ และ ช)

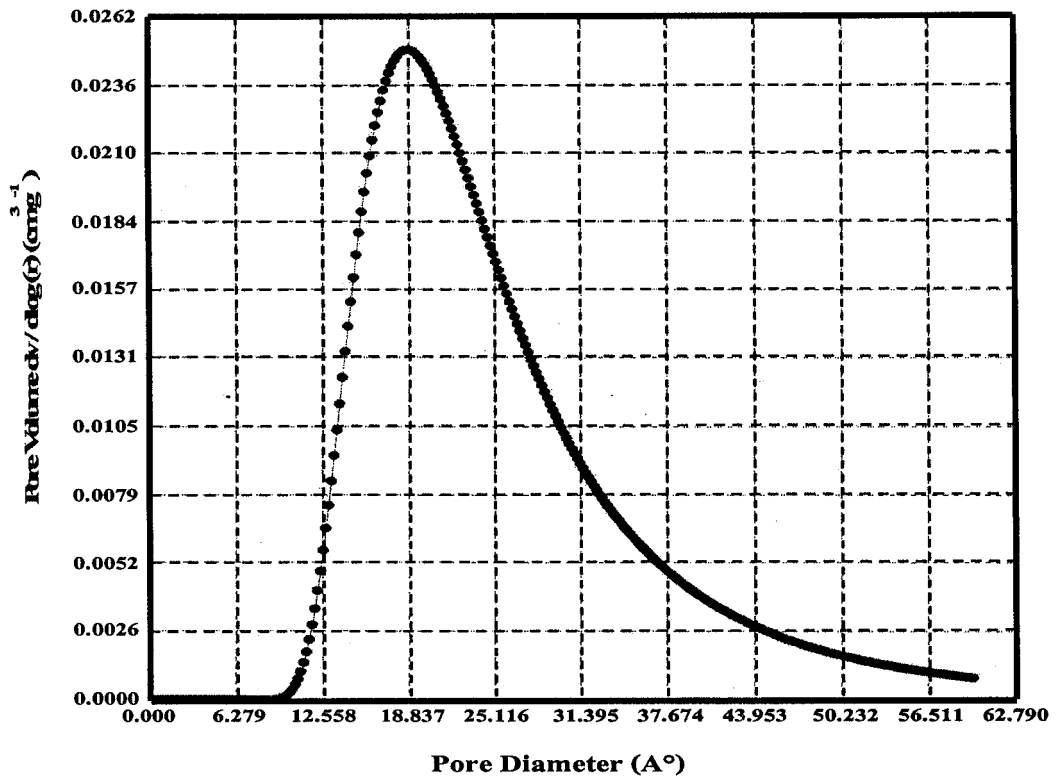
ตารางที่ 4.6 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของมุลโคและถ่านมุลโค

ตัวดูดซับ	วิธีวิเคราะห์	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Å)
มุลโค	Micropore	32.63	26.78
ถ่านมุลโค	Micropore	302.43	18.83

พบว่ามุลโคและถ่านมุลโคมีพื้นที่ผิว 12.63 และ 302.43 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านมุลโคมีพื้นที่ผิวมากกว่ามุลโค แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu^{2+}) สังกะสีที่มากกว่ามุลโค ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการดูดซับที่ได้ ในหัวข้อ 4.2 ในส่วนของผลการกระจายตัวรูพรุนของมุลโคและถ่านมุลโค แสดงดังภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ พบว่ารูพรุนส่วนใหญ่ของมุลโคมีขนาด 26.78 Å (อยู่ในช่วง 20-250 Å) ซึ่งเป็นแบบรูพรุนขนาดกลาง ตามการแบ่งของ Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ส่วนรูพรุนส่วนใหญ่ของถ่านมุลโคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.83 Å (< 20 Å) ซึ่งเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ตามการแบ่งของ IUPAC



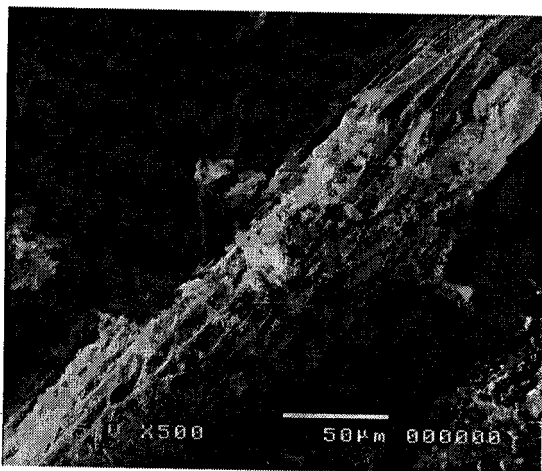
ภาพที่ 4.9 การกระจายตัวรูพรุนขนาดกลางของมุลโค



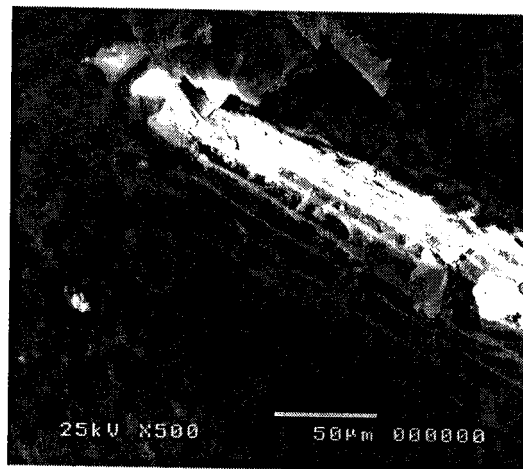
ภาพที่ 4.10 การกระจายตัวรูพรุนขนาดกลางของถ่านมูลโค

4.3.2 ภาพถ่ายจุลโครงสร้างของตัวดูดซับ

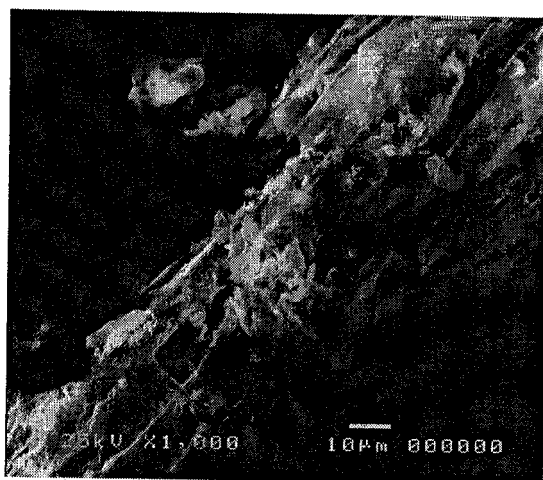
ผลการศึกษายถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาจุลโครงสร้างของมูลโคและถ่านมูลโค ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายทองแดงที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



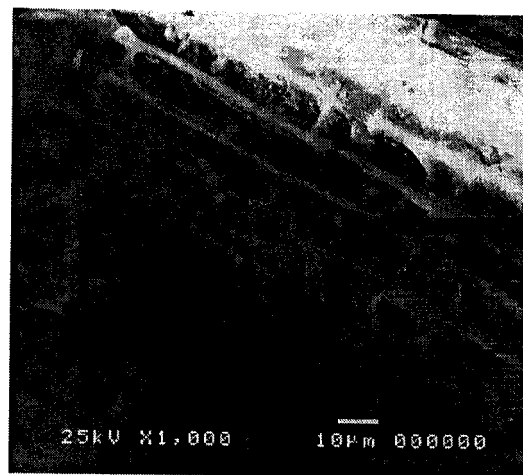
ก) ก่อนการดูดซั้บ 500 เท่า



ข) หลังการดูดซั้บ 500 เท่า



ค) ก่อนการดูดซั้บ 1,000 เท่า

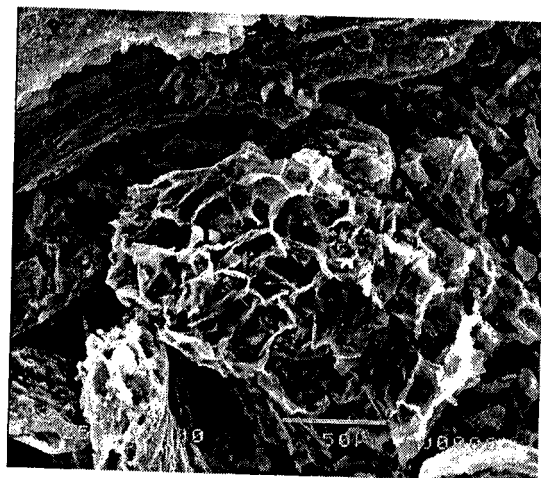


ง) หลังการดูดซั้บ 1,000 เท่า

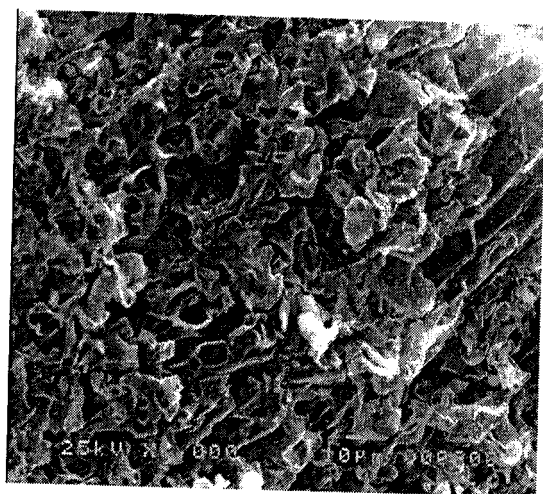
ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของมูลโคก่อนและหลังการดูดซั้บที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า



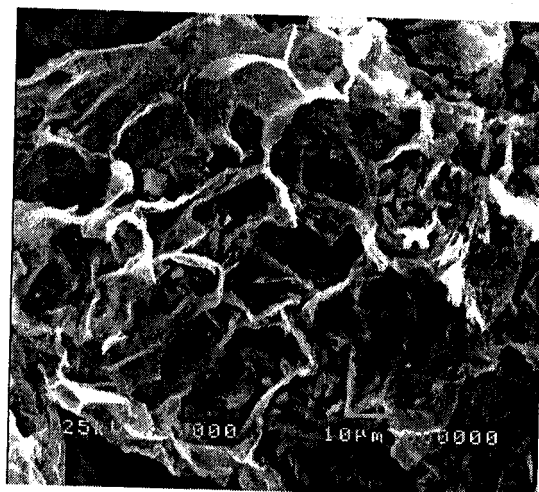
ก) ก่อนการดูดซับ 500 เท่า



ข) หลังการดูดซับ 500 เท่า



ค) ก่อนการดูดซับ 1,000 เท่า



ง) หลังการดูดซับ 1,000 เท่า

ภาพที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของถ่านมูลโคก่อนและหลังการดูดซับที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า

จากภาพที่ 4.11 มีการตรวจพบว่าจุลโครงสร้างมูลโคก่อนดูดซับมีรูปร่างเป็นแท่งยาว ด้านในมีรูพรุนเป็นปล่องๆ โดยทั่วไปโครงสร้างพื้นผิวกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่หลังการดูดซับสารละลายทองแดง จุลโครงสร้างดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเรียงตัวของผลึกทองแดงที่เกิดจากการดูดซับที่ผิวของจุลโครงสร้าง

ส่วนภาพที่ 4.12 มีการตรวจพบจุลโครงสร้างของถ่านมูลโคก่อนการดูดซับ โครงสร้างพื้นผิวมีลักษณะพรุนคล้ายฟองน้ำ กระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นระเบียบ แต่หลังการดูดซับสารละลายทองแดง จุลโครงสร้างดังกล่าวมีรูพรุนที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเรียงตัวของผลึกทองแดงที่เกิดจากการดูดซับที่ผิวของจุลโครงสร้าง

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างมูลโคและถ่านมูลโค พบว่าถ่านมูลโคมีลักษณะเป็นรูพรุนมากกว่า ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ได้ดีกว่า สอดคล้องกับผลไอโซเทอร์มของการดูดซับที่ได้ในหัวข้อ 4.2

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง ปริมาณที่เหมาะสมของมูลโคและถ่านมูลโคเท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มล. ของสารละลายทองแดง

5.1.2 สมการแลงเมียร์ และ สมการฟรุนดลิช สามารถใช้ในการอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับทองแดงของถ่านมูลโคได้ ($r^2 > 0.9$)

5.1.3 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล คือ 30 นาที ทุกค่าพีเอช สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับมูลโคและถ่านมูลโค คือ พีเอช 4 และพีเอช 2 ตามลำดับ ตลอดช่วงเวลากการดูดซับ

5.1.4 ค่า BOD และ COD อธิบายถึงปริมาณสารอินทรีย์ ในสารละลายทองแดงหลังการดูดซับด้วยมูลโค มีค่าสูงเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม คือ 460 และ 612 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่สำหรับถ่านมูลโค ตรวจไม่พบ ดังนั้นถ่านมูลโคมีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวดูดซับมากกว่ามูลโค

5.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของถ่านมูลโคที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ ร้อยละ 93.73, 27.50 และ 15.20 ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงลดลง

5.1.6 ค่าพื้นที่ผิวของมูลโคและถ่านมูลโคให้ค่าที่ 32.63 และ 302.43 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของมูลโคและถ่านมูลโค คือ 26.78 และ 18.83 Å ตามลำดับ พบว่า มูลโคมีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง ส่วนถ่านมูลโคมีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก

5.1.7 ภาพถ่าย SEM ของจุลโครงสร้างก่อนการดูดซับตรวจพบว่าโครงสร้างพื้นผิวกระจายตัวไม่เป็นระเบียบ แต่หลังการดูดซับ โครงสร้างพื้นผิวเป็นระเบียบมากขึ้น ทั้งมูลโคและถ่านมูลโค

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน ที่อยู่บนมูลโคและถ่านมูลโคโดยใช้เทคนิคอินฟราเรด (Infrared spectroscopy, IR) เพื่ออธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น

5.2.2 ควรศึกษาอิทธิพลของขนาดของตัวดูดซับ ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

5.2.3 ควรศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักประเภทอื่นๆ ในกระบวนการชุบ เช่น นิกเกิล โครเมียม เป็นต้น

5.2.4 ควรมีการประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในการใช้มูลโคและถ่านมูลโคเป็นตัวดูดซับ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- โกศล วงศ์สวรรค์, สถิต วงศ์สวรรค์. ปัญหาสังคมไทย. กรุงเทพฯ : รวมสาสน์, 2543.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม. หลักปฏิบัติเพื่อป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตสะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขาขุบโลหะ. กรุงเทพฯ : สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์, 2539.
- ณัฐวี เนาวรัตน์วัฒนา. การใช้ขุบเปิดลดปริมาณโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานขุบโครเมียม วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2544.
- ดวงกมล พรหมสุวรรณ. การกำจัดโครเมียมและนิเกิลจากน้ำเสียโดยใช้เส้นใยปาล์มปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2541.
- ธีรยุทธ อุดมพร. การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียร้านขุบโครเมียมด้วยเรซินผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2544.
- ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กองแผนงาน, กรมปศุสัตว์. (อค์สำเนา), 2546.
- มันสิน ดันทุลเวสม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน ดันทุลเวสม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- วิไลลักษณ์ เชิดสุข. การนำโลหะหนักจากน้ำล้างชิ้นงานที่ผ่านการขุบโลหะกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ แกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- วลัยรัตน์ จันทรวงศ์. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานขุบโลหะ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 9. ฉบับที่ 2. หน้า 4-8, 2542.
- เอกชัย ประสาทมงคล. การดูดซับโครเมียมด้วยเส้นใยจากเปลือกสับปะรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2546.
- Cheremisinoff, N. Pual and Ellerbusch, Fred. Carbon Adsorption Handbook. Michigan: Ann Arbor Science, 1973.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Crist, R.H. Oberholser, K. Megarrity, J. Crist, D.R. and Brittsan, J.M. Interactions of Metal and Proton with algae, 3. Marine algac, with Emphasis on Lead and Alumium. Environ. Sci. Technol. 26 : 496-502, 1992.
- Freundlich, H. Über die Adsorption in Lösungen. Z. Phys. Chem. 57, 385-470, 1906.
- Henry, L.E. and Brierley, C.L. Microbial Mineral Recovery. Mcbraw. Hill pp; 249-320, 1990
- Langmuir, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Amer. J. Chem. Soc. 40, 1361-1403, 1918.
- Low, K.S. Lee, C.K. and Leo A.C. Removal of metals from electroplating wastes using banana pith. Biotechnol. 51, 227-231, 1994.
- Mattuschka, B. and Straube, G. Biosorption of Matsals a waste biomass. S. Chem. Tech. Biotechnol. 58, 57-63, 1993.
- Said, O.B. Shalmor, M.B. and Egila J.N. A note on the binding of nickel and copper ions by cellulosic materials. Biotechnol. 43, 63-65, 1993.
- Sanongraj, et al.,. Chicken's Egg Shell Technology for Pretreatment of Waste Solution from Acid Copper Electroplating Baths. International Conference: Hazardous Waste Management for a Sustainable Future, January 10-12, Bangkok, Thailand.
- Suzuki, M. Adsorption Engineering. Japan: Kodansha Ltd, 1998.
- Tare, V. Chaudhari, S. and Jawed M. Comparative evaluation of soluble and insoluble xanthate process for heavy metal removal from wastewater. Water Science Technology. 26, 237-246, 1992.
- Terry, J.B. The Immobilized of solute Metals by Bacterial Walls. Biochemistry. 355-366, 1986.
- Vladimir, P. Zlatko K. and Slavoj C. Adsorption on solid. Translated by Smith D., N.G. Adams. Czechoslovakia: Butterworth Group, 1974.
- Volesky, B. Removal and Recovery of Heavy Matsals by Biosorption. In Biosorption of Heavy Matal. [n.d.], 1990.
- Volesky, B. and Holan, Z.R. Biosorption of Heavy Matsals. Biotechnol. Prog. 11, 235-250, 1995.
- Yoshiyuki, S. and Yutaka, K. Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. Biotechnol. Prog. 90, 241-247, 2003.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง
(ปริมาณที่เหมาะสม)

ผลการทดลอง
(ปริมาณที่เหมาะสม)

ตารางที่ ก-1 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดของมูลโค
ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณ (กรัมต่อ100 มิลลิลิตร)	มูลโค					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0.5	11.54	10.42	10.98	42.30	47.90	45.10
1.0	6.374	5.178	5.776	68.13	74.11	71.12
1.5	5.113	3.421	4.267	74.44	82.90	78.04
2.0	4.487	2.699	3.593	77.57	86.51	82.04
2.5	3.035	2.089	2.562	84.83	89.56	87.19

ตารางที่ ก-2 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดของถ่านมูลโค
ณ เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณ (กรัมต่อ100 มิลลิลิตร)	ถ่านมูลโค					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0.5	5.906	4.568	5.237	70.47	77.16	73.81
1.0	0.688	0.36	0.524	96.56	98.20	97.38
1.5	0.576	0.228	0.402	97.12	98.86	97.99
2.0	0.412	0.376	0.394	97.94	98.12	98.03
2.5	0.256	0.038	0.147	98.72	99.81	99.26

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง
(เวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ)

ผลการทดลอง
(เวลาและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ)

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
มุลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

เวลา (นาที)	พีเอช 2					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	8.273	6.171	7.222	58.63	69.14	63.89
10	5.786	3.882	4.834	71.07	80.59	75.83
15	5.109	4.097	4.603	74.45	79.51	76.98
30	4.145	3.775	3.96	79.27	81.12	80.20
60	4.076	3.236	3.656	79.62	83.82	81.72
90	3.96	3.456	3.708	80.2	82.72	81.46
120	3.897	3.413	3.655	80.51	82.93	81.72

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
มุลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)

เวลา (นาที)	พีเอช 2					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	7.843	5.741	6.792	56.48	66.99	61.74
10	5.356	3.452	4.404	68.92	78.44	73.68
15	4.679	3.667	4.173	72.30	77.36	74.83
30	3.715	3.345	3.53	77.12	78.97	78.05
60	3.646	2.806	3.226	77.47	81.67	79.57
90	3.53	3.026	3.278	78.05	80.57	79.31
120	3.467	2.983	3.225	78.36	80.785	79.57

**ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
มุลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์**

เวลา (นาทึ)	พีเอช 4					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	4.163	2.701	3.432	79.18	86.49	82.84
10	3.679	2.669	3.174	81.60	86.65	84.13
15	3.345	2.769	3.057	83.27	86.15	84.71
30	3.123	2.095	2.609	84.38	89.52	86.95
60	2.986	1.712	2.349	85.07	91.44	88.25
90	2.545	1.773	2.159	87.27	91.13	89.20
120	2.432	1.662	2.047	87.84	91.69	89.76

**ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
มุลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)**

เวลา (นาทึ)	พีเอช 4					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	3.143	1.681	2.412	74.08	81.39	77.74
10	2.659	1.649	2.154	76.50	81.55	79.03
15	2.325	1.749	2.037	78.17	81.05	79.61
30	2.103	1.075	1.589	79.28	84.42	81.85
60	1.966	0.692	1.329	79.97	86.34	83.15
90	1.525	0.753	1.139	82.17	86.03	84.10
120	1.412	0.642	1.027	82.74	86.59	84.66

ตารางที่ ข-5 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
มูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

เวลา (นาทื)	พีเอช 6					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	4.541	5.837	5.189	77.29	70.81	74.055
10	3.768	4.076	3.922	81.16	79.62	80.39
15	3.685	3.429	3.557	81.57	82.85	82.21
30	3.233	2.733	2.983	83.83	86.33	85.08
60	3.021	1.981	2.501	84.89	90.09	87.49
90	2.975	1.299	2.137	85.12	93.50	89.31
120	2.543	1.931	2.237	87.28	90.34	88.81

ตารางที่ ข-6 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
มูลโค (ปรับแก้ค่าตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)

เวลา (นาทื)	พีเอช 6					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	6.983	4.881	5.932	70.84	64.36	67.60
10	4.496	2.592	3.544	74.71	73.17	73.94
15	3.819	2.807	3.313	75.12	76.40	75.76
30	2.855	2.485	2.67	77.38	79.88	78.63
60	2.786	1.946	2.366	78.44	83.64	81.04
90	2.67	2.166	2.418	78.67	87.05	82.86
120	2.607	2.123	2.365	80.83	83.89	82.36

ตารางที่ ข-7 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

เวลา (นาทื)	พีเอช 2					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	2.554	2.324	2.439	87.23	88.38	87.80
10	1.543	0.353	0.948	92.28	98.23	95.26
15	0.768	0.51	0.639	96.16	97.45	96.80
30	0.231	0.017	0.124	98.84	99.91	99.38
60	0.224	0.008	0.116	98.88	99.96	99.42
90	0.113	0.029	0.071	99.43	99.85	99.64
120	0.078	0.07	0.074	99.61	99.65	99.63

ตารางที่ ข-8 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)

เวลา (นาทื)	พีเอช 2					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	2.124	1.894	2.009	85.08	86.23	85.65
10	1.113	-0.077	0.518	90.13	96.08	93.11
15	0.338	0.08	0.209	94.01	95.30	94.65
30	-0.199	-0.413	-0.306	96.69	97.76	97.23
60	-0.206	-0.422	-0.314	96.73	97.81	97.27
90	-0.317	-0.401	-0.359	97.28	97.70	97.49
120	-0.352	-0.36	-0.356	97.46	97.50	97.48

ตารางที่ ข-9 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

เวลา (นาทึ)	พีเอช 4					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	0	0	0	100	100	100
10	0	0	0	100	100	100
15	0	0	0	100	100	100
30	0	0	0	100	100	100
60	0	0	0	100	100	100
90	0	0	0	100	100	100
120	0	0	0	100	100	100

ตารางที่ ข-10 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)

เวลา (นาทึ)	พีเอช 4					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90
10	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90
15	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90
30	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90
60	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90
90	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90
120	-1.02	-1.02	-1.02	94.90	94.90	94.90

ตารางที่ ข-11 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

เวลา (นาทื)	พีเอช 6					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	0	0	0	100	100	100
10	0	0	0	100	100	100
15	0	0	0	100	100	100
30	0	0	0	100	100	100
60	0	0	0	100	100	100
90	0	0	0	100	100	100
120	0	0	0	100	100	100

ตารางที่ ข-12 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)

เวลา (นาทื)	พีเอช 6					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
5	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55
10	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55
15	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55
30	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55
60	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55
90	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55
120	-1.29	-1.29	-1.29	93.55	93.55	93.55

ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

(ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงสังเคราะห์)

ผลการทดลอง
(ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงสังเคราะห์)

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโครวมตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้น เริ่มต้น (มก/ล)	ถ่านมูลโค					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
20	0.075	0.392	0.234	99.63	98.04	98.83
200	111.86	117.34	114.60	44.07	41.33	42.70
500	360.12	341.38	350.75	27.98	31.72	29.85

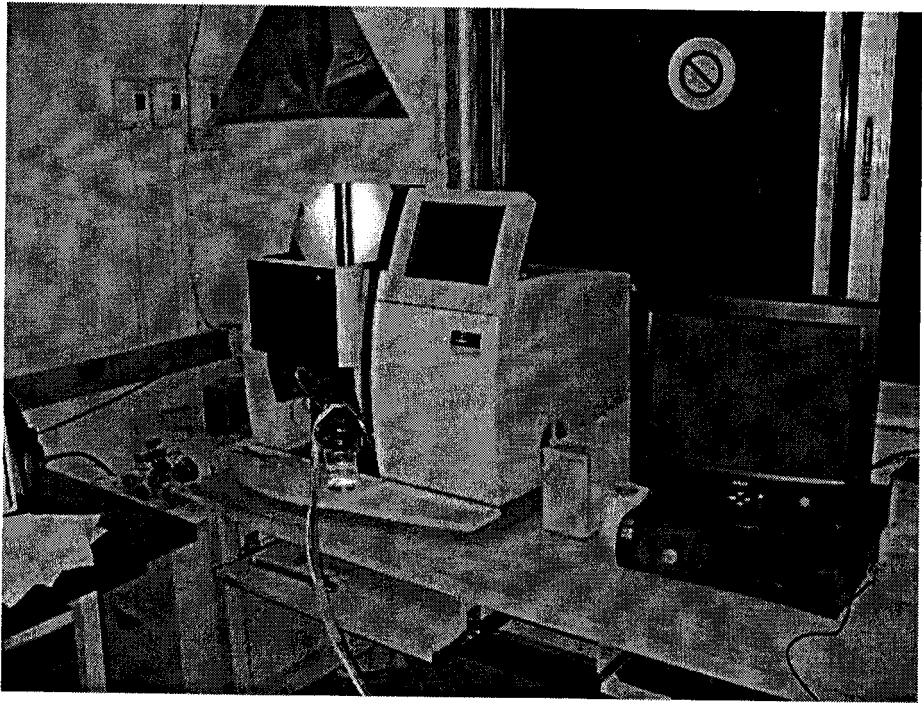
ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นสารละลายทองแดงที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของ
ถ่านมูลโค (ปรับแก้ค่าตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์)

ความเข้มข้น เริ่มต้น (มก/ล)	ถ่านมูลโค					
	ความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
20	0.075	0.392	0.234	94.53	92.94	93.73
200	111.86	117.34	114.60	28.87	26.13	27.50
500	360.12	341.38	350.75	13.33	17.07	15.20

ภาคผนวก ง
กราฟมาตรฐานสำหรับวัดหาปริมาณทองแดง

กราฟมาตรฐานสำหรับวัดหาปริมาณทองแดง

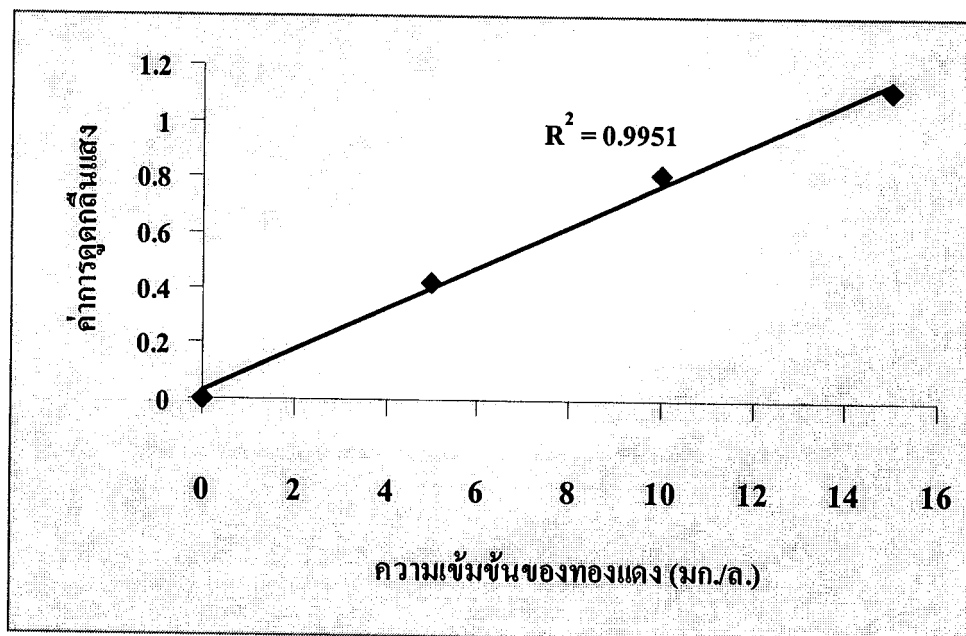
การสร้างกราฟมาตรฐานทำได้โดยนำสารละลายโลหะหนักที่มีปริมาณความเข้มข้นแน่นอนมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งในการวัดหาปริมาณโลหะหนักสำหรับการทดลองต้องสร้างกราฟมาตรฐานใหม่ทุกวันเนื่องจากในแต่ละวันอุณหภูมิไม่เท่ากัน และต้องเป็นกราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิดตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย



ภาพที่ ง-1 เครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์ชันสเปกโตรสโกปี รุ่น Analyst 200

ตารางที่ ง-1 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการหาความเข้มข้นของทองแดง

ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืน
5	0.420
10	0.809
15	1.114



ภาพที่ ง-2 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของทองแดง

ภาคผนวก จ
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (2539)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (2539)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่จะได้นำไปทำอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีที่กำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช่วิธีเจือจาง (Dilution) ” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความถึงรวมถึงน้ำเสียจากการใช้ของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทึดเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่า ดังนี้

2.1 ค่า ทึดเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจจะแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำ ที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทึดเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทึดเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(3) โลหะหนักมีค่าดังนี้

3.1ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

- 3.2 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.6 โครเมียม (Chromium)
 - 3.6.1 Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 3.6.2 Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.7 บาเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.8 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (1) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (2) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (3) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (4) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (5) คลอรีนอิสระ (Free-Chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (6) เพสติไซด์ (Pesticide) ไม่ต้องมี
- (7) อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
- (8) สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- (9) กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- (10) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (11) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (12) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(13) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH meter)

(2) การตรวจสอบค่า บีโอดี ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าที่เคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)

(5) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตาม คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

ไชยวัฒน์ สิ้นสุวรรณ

(ไชยวัฒน์ สิ้นสุวรรณ)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศลงในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52 ง วันที่ 27 มิถุนายน 2539

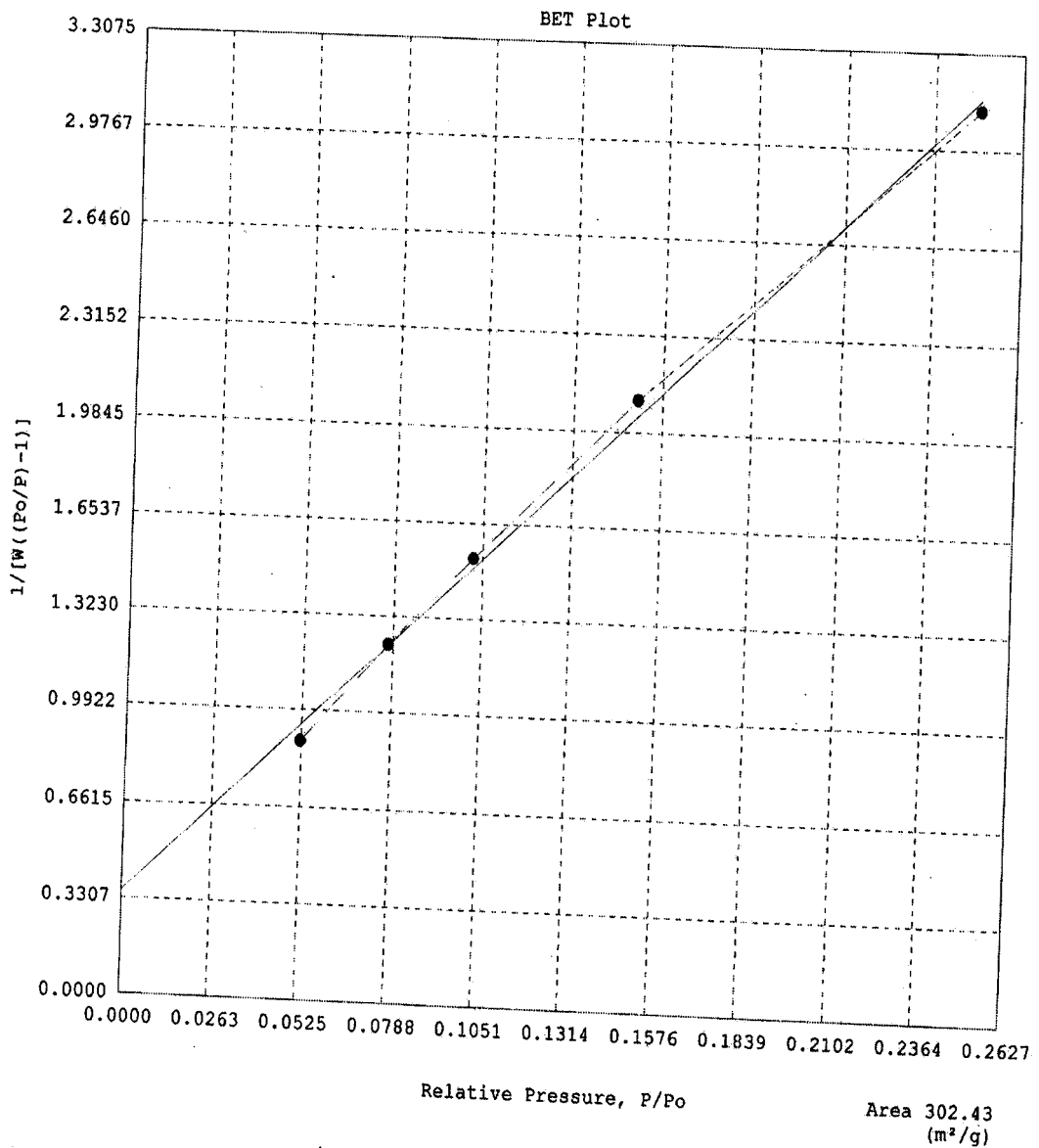
ภาคผนวก ง
ค่าวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area analysis)
(จุดโครงสร้างของตัวดูดซับ)

ค่าวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area analysis) (จุดโครงสร้างของตัวดูดซับ)

01/06/2007

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.51

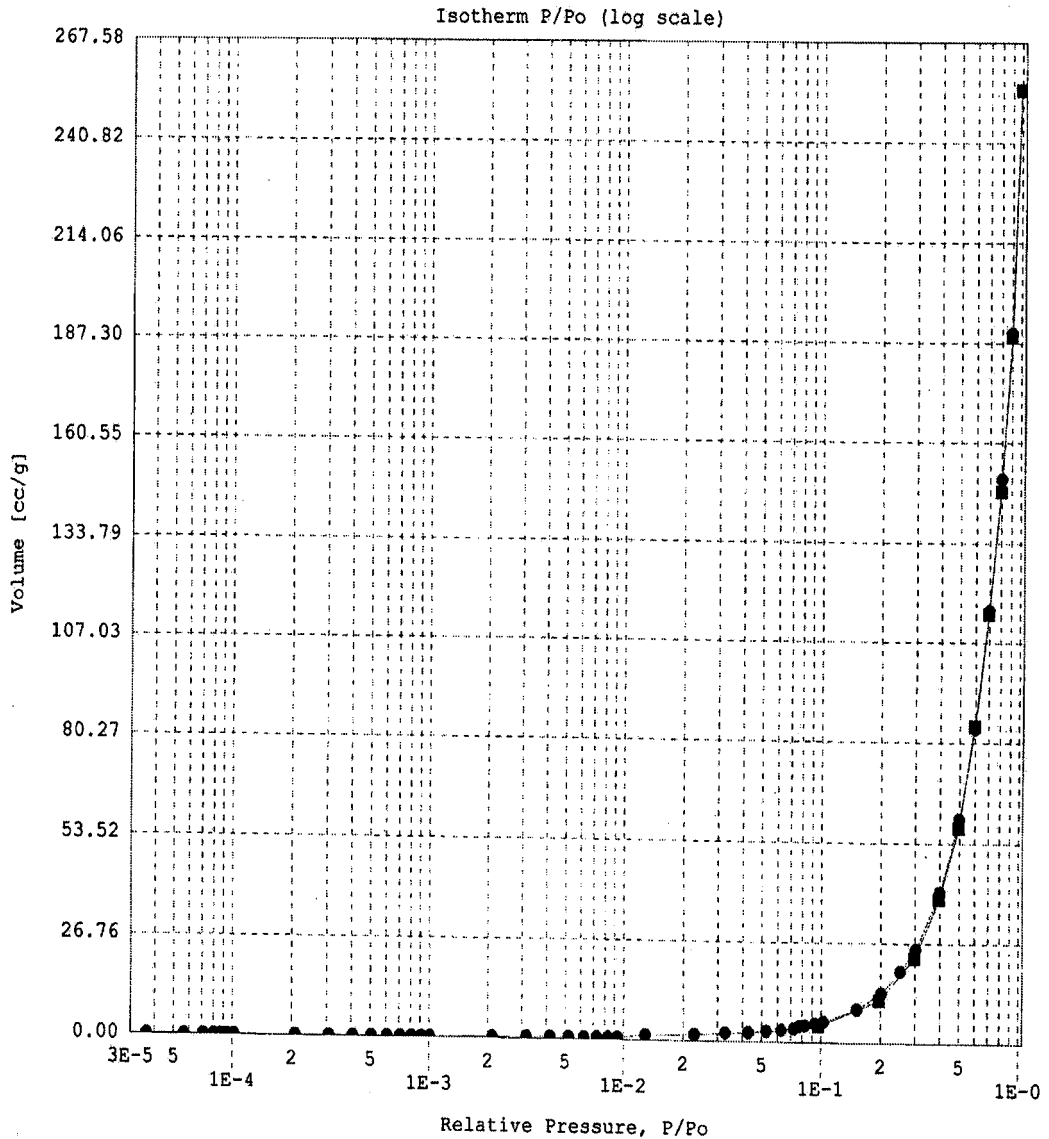
File name:	C:\QCdata\PhysData\F_Kae\CC_500C_COW_30MIN_01.raw		
Sample ID:	micropore	Description:	project MD
Comments:			
Operator:	kae.	Sample weight:	0.0072 g
Analysis gas:	Nitrogen	X sect. area:	16.2 Å ² /molec
Adsorbate (DRP):	Nitrogen	Bath Temp.:	77.30
Outgas Temp:	350.0 °C	Outgas Time:	23.0 hrs
P/Po tolerance:	0	Equil. time:	6
Station #:	1	PC sw. version:	1.51
	A ● BF	Non-ideality:	6.58e-05
		Analysis Time:	3370.9 min
		End of run:	11/16/2006 19:27
		TempComp:	On



01/06/2007

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.51

File name:	C:\QCdata\PhysData\P_Kae\RAW_550C_30MIN.raw		
Sample ID:	micropore	Description:	project_MD
Comments:			
Operator:		Sample weight:	0.0058 g
Analysis gas:	Nitrogen	X sect. area:	16.2 Å ² /molec
Adsorbate (DRP):	Nitrogen	Bath Temp.:	77.30
Outgas Temp:	0.0 °C	Outgas Time:	0.0 hrs
P/Po tolerance:	0	Equil. time:	6
Station #:	1	PC sw. version:	1.51
		Non-ideality:	6.58e-05
		Analysis Time:	417.5 min
		End of run:	11/04/2006 22:08
		TempComp:	On



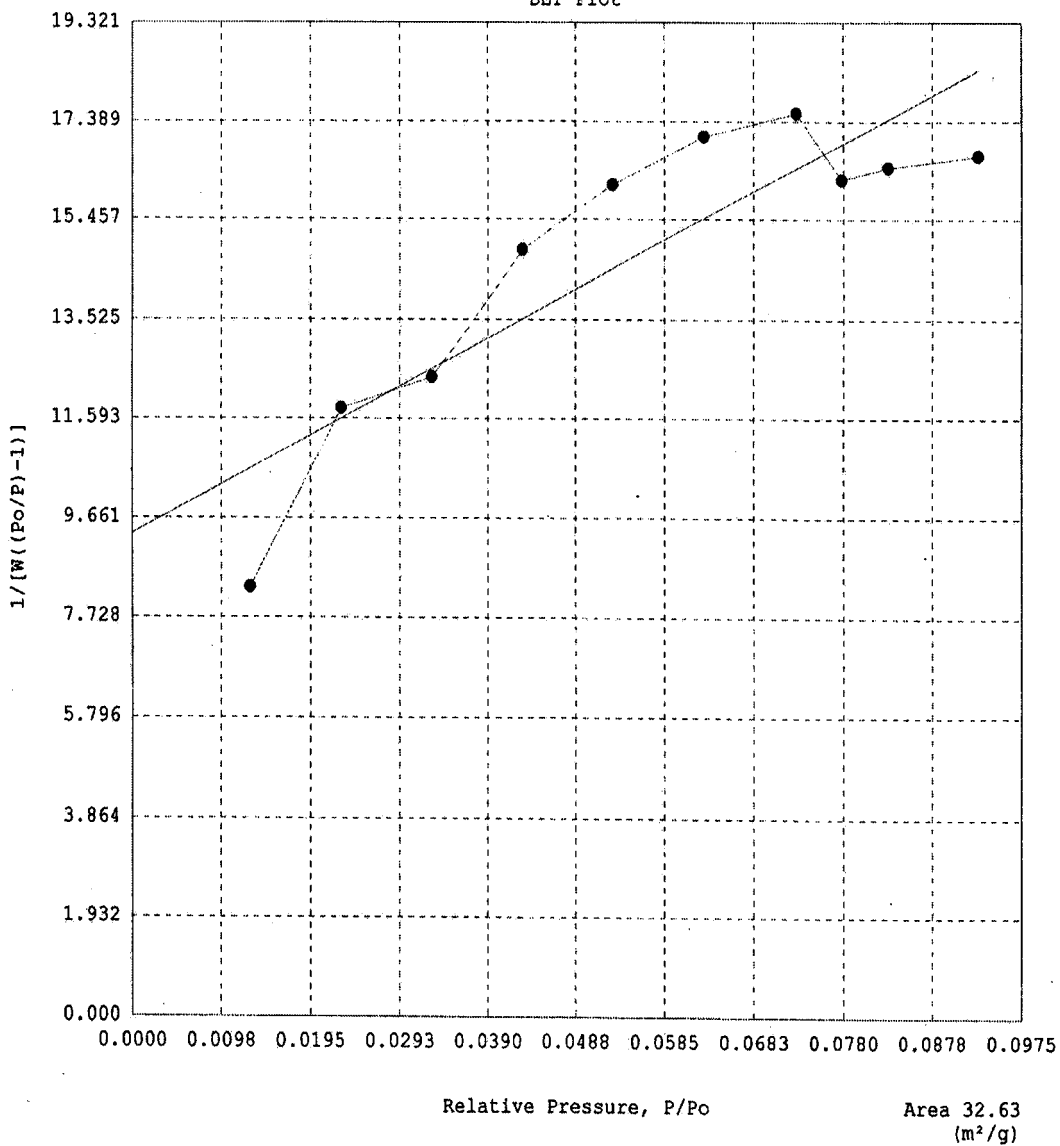
01/06/2007

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.51

File name:	C:\QCdata\PhysData\P_Kae\RAW_550C_30MIN.raw		
Sample ID:	micropore	Description:	project_MD
Comments:			
Operator:		Sample weight:	0.0058 g
Analysis gas:	Nitrogen	X sect. area:	16.2 Å ² /molec
Adsorbate (DRP):	Nitrogen	Bath Temp.:	77.30
Outgas Temp:	0.0 °C	Outgas Time:	0.0 hrs
P/Po tolerance:	0	Equil. time:	6
Station #:	1	PC sw. version:	1.51
		Non-ideality:	6.58e-05
		Analysis Time:	417.5 min
		End of run:	11/04/2006 22:08
		TempComp:	On

A ● BF —

BET Plot



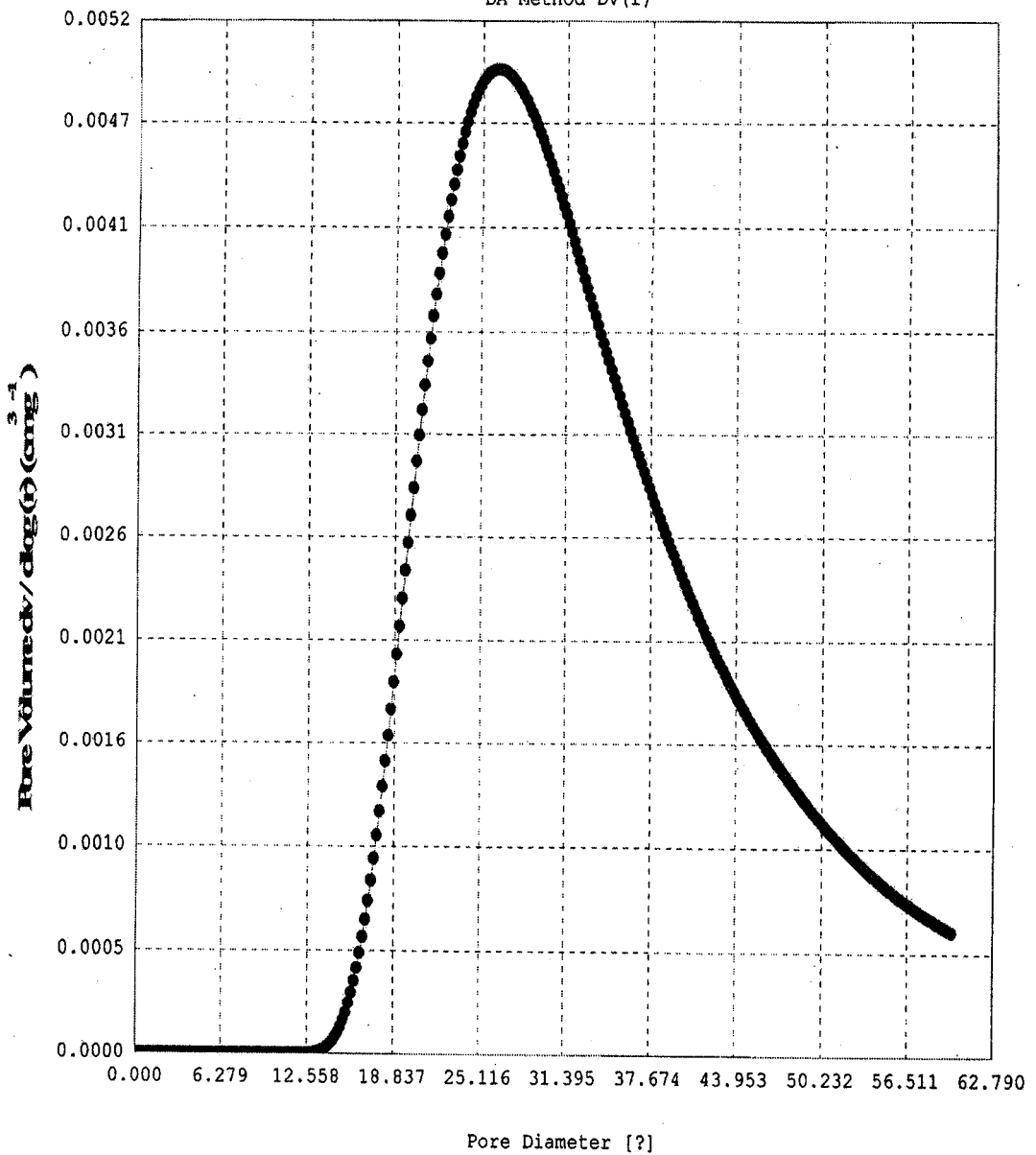
ภาคผนวก ข
เส้นผ่าศูนย์กลางรูปวง
(จุดโครงสร้างตัวจุดจับ)

เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (จุดโครงสร้างตัวดูดซับ)

03/03/2007

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.51

File name:	C:\QCdata\PhysData\P_Kae\RAW_550C_30MIN.raw		
Sample ID:	micropore	Description:	project_MD
Comments:			
Operator:		Sample weight:	0.0058 g
Analysis gas:	Nitrogen	X sect. area:	16.2 Å ² /molec
Adsorbate (DRP):	Nitrogen	Bath Temp.:	77.30
Outgas Temp:	0.0 °C	Outgas Time:	0.0 hrs
P/Po tolerance:	0	Equil. time:	6
Station #:	1	PC sw. version:	1.51
		DA Method Dv(r)	
		Non-ideality:	6.58e-05
		Analysis Time:	417.5 min
		End of run:	11/04/2006 22:08
		TempComp:	On

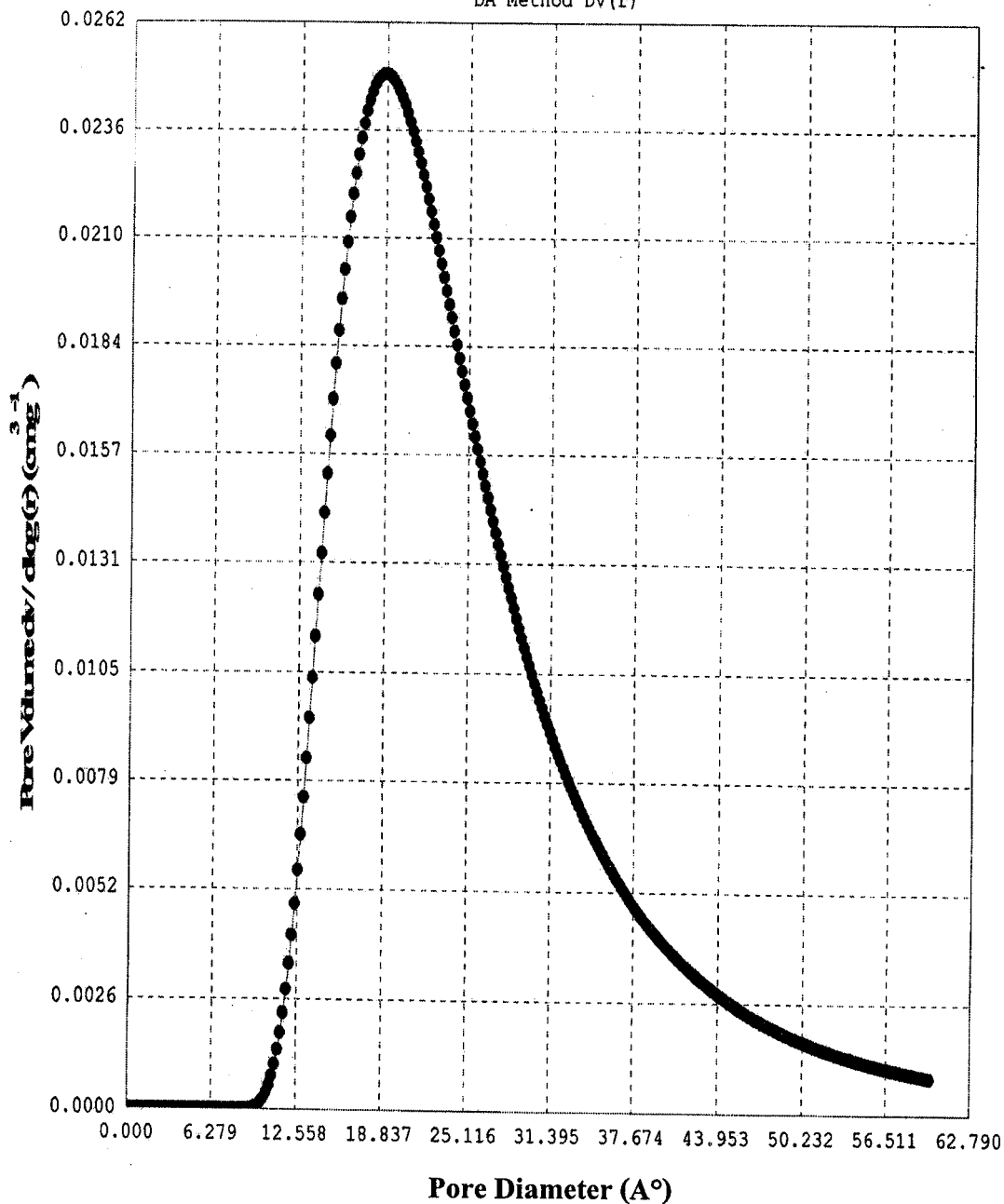


Pore Diameter (Å°)

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.51

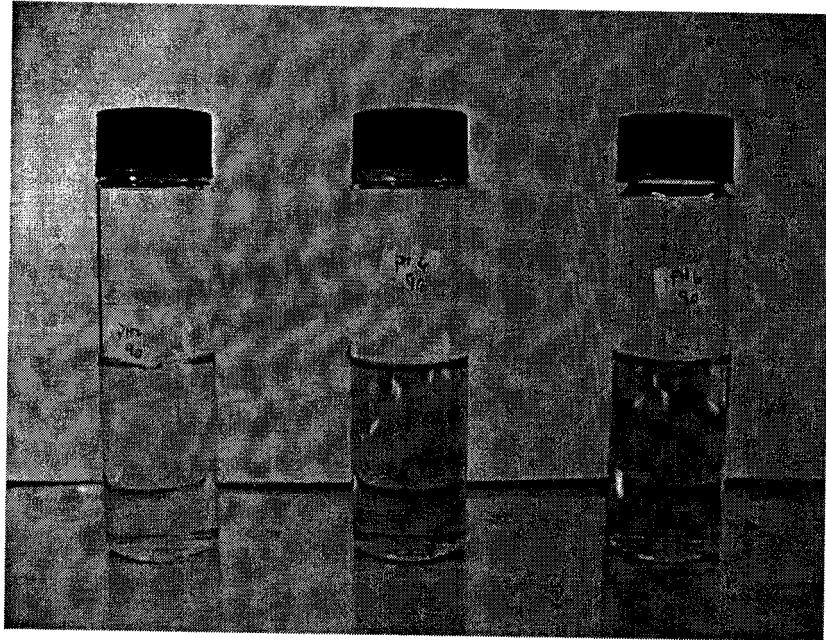
File name:	C:\QCdata\PhysData\P Kae\CC_500C_COW_30MIN_01.raw		
Sample ID:	micropore	Description:	project_MD
Comments:			
Operator:	kae	Sample weight:	0.0072 g
Analysis gas:	Nitrogen	X sect. area:	16.2 Å ² /molec
Adsorbate (DRP):	Nitrogen	Bath Temp.:	77.30
Outgas Temp:	350.0 °C	Outgas Time:	23.0 hrs
P/Po tolerance:	0	Equil. time:	6
Station #:	1	PC sw. version:	1.51
		Non-ideality:	6.58e-05
		Analysis Time:	3370.9 min
		End of run:	11/16/2006 19:27
		TempComp:	On

DA Method Dv(r)

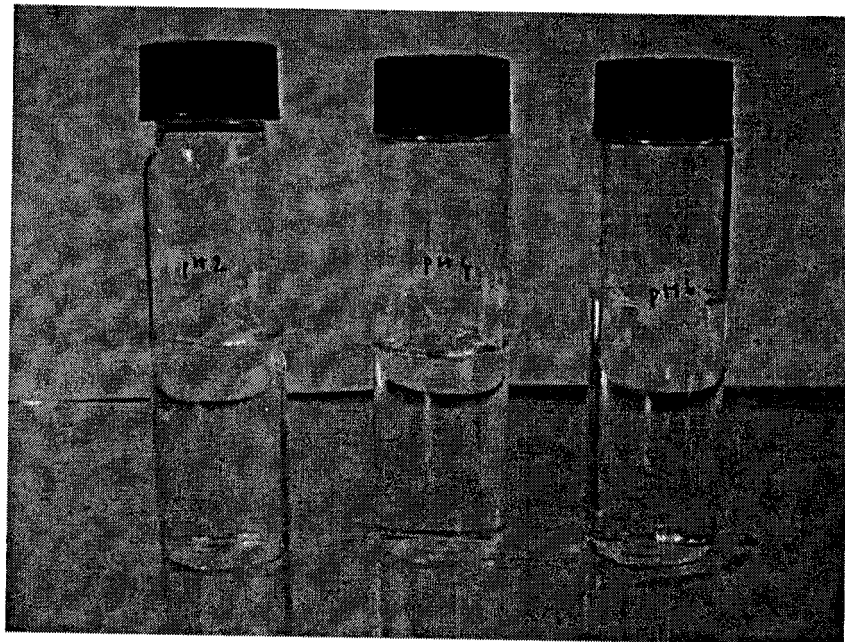


ภาคผนวก ซ
ภาพกิจกรรมการทดลอง

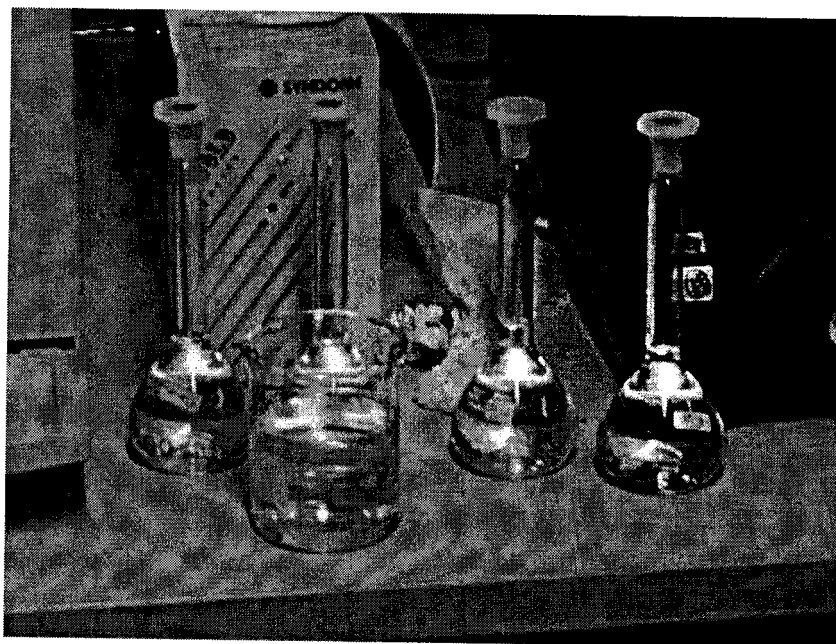
ภาพกิจกรรมการทดลอง



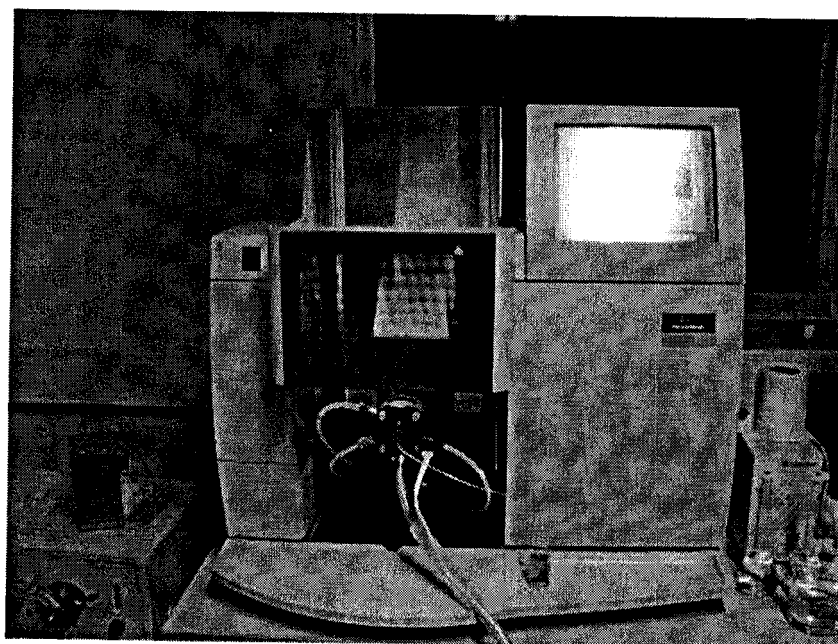
ภาพที่ ข-1 สารละลายทองแดง (Cu^{2+}) ตั้งคราะห์หลังการดูดซับด้วยมุลโค ที่ค่า 2, 4 และ 6



ภาพที่ ข-2 สารละลายทองแดง (Cu^{2+}) ตั้งคราะห์หลังการดูดซับด้วยถ่านมุลโค ที่ค่า 2, 4 และ 6



ภาพที่ ข-3 สารละลายมาตรฐานทองแดง



ภาพที่ ข-4 สีของเปลวไฟขณะวัดสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง AAS

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางชนยิตรี แสงวิจิตร
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี คลองหก, พ.ศ. 2538-2541 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีวิเคราะห์)
ประวัติวิจัย	นำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อเรื่อง “การใช้ประโยชน์จาก มูลโคและถ่านมูลโค สำหรับดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียใน กระบวนการชุบไฟฟ้า” ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและ เคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2542-2543 มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร พ.ศ. 2543-ปัจจุบัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
ตำแหน่งและสถานที่ปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร