



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ)

Treatment of Heavy metal Contaminated Water by Natural Mixed Shell (Krasa)

นามผู้วิจัย นางสาวอนิศา ทรัพย์นิวัตต์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุดตมวงศ์, Ph.D.)

รักษาราชการแทน

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์สัญญาสิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ)

Treatment of Heavy metal Contaminated Water by Natural Mixed Shell (Krasa)

โดย

นางสาวอนิสา ทรัพย์นิวัตต์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนิสา ทรัพย์นิวัตต์ 2556: การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสม
ธรรมชาติ (กระช้ำ) ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D. 105 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกหอยผสม
ธรรมชาติ (กระช้ำ) ที่มีอยู่ในจังหวัดสมุทรสาครซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นหอยสองฝาได้แก่ หอย
ลาย หอยตลับ และหอยแครง มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.6214 ตร.ม/กรัม ความหนาแน่น 1.5621 กรัม/
มล. ขนาดรูพรุน 6,000 อังสตรอม ขนาดประสิทธิผล 0.28 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความ
สม่ำเสมอ 7.27 เมื่อทำการทดลองแบบแบตช์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี
ทองแดง และแคดเมียม คือ พีเอช 5.61 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที
ปริมาณ 0.25 กรัม ขนาด 2 - 4.275 มิลลิเมตร และอุณหภูมิ 26 ± 0.5 องศาเซลเซียส โดยสามารถ
ลดปริมาณโลหะหนักได้ 40- 65 % ไอโซเทอร์มในการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบแลงเมียร์
และจลนศาสตร์ดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่า pseudo-
first order ในการทดลองแบบคอลัมน์ (1 BV เท่ากับ 0.253 ลิตร) พบว่าอายุการใช้งานในการดูด
ซับจนหมดสภาพของทองแดง มากกว่า สังกะสีและแคดเมียม ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูด
ซับลดลงประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Anisa Thapniwat 2013: Treatment of Heavy metal Contaminated Water by Natural Mixed Shell (Krasa). Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 105 pages.

The adsorption of heavy metals from synthetic wastewater by using natural mixed shell (Krasa) in Samut Sakhon province was studied. The main elements of Krasa are bivalves such as Carpet shell, Venus shell and Cockle shell. Specific surface was $0.6214 \text{ m}^2/\text{g}$, density was 1.5621 g./ml , pore size was 6000 \AA , effective Size was 0.28 mm and uniformity coefficient was 7.27 . The adsorption capacities and rates of heavy metal onto Krasa were studied in a batch adsorption system. Maximum zinc, copper and cadmium adsorption was found at pH 5.61, shaking time 60 minutes, contact time 60 minutes. The amount of 0.25 g. size $2-4.275 \text{ mm.}$ and temperature was $26 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ can reduce the 40-65 % of heavy metals. Adsorption isotherm data of the heavy metal could be well explained by the Langmuir model. The kinetic experimental data properly more correlated with pseudo-second order kinetic model than pseudo-first order. In a column adsorption system ($1 \text{ BV}=0.253 \text{ liter}$), service time until exhaust point of copper adsorption was more than zinc and cadmium adsorption respectively. The metal plating factory wastewater had performance was lower than the synthetic wastewater about 3-5 %

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบ
ขอบพระคุณ มณฑล ฐานุตตมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผศ. อรรณพ หอมจันทร์ ที่ให้
คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำตลอดระยะเวลาในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ ขอกราบ
ขอบพระคุณ ดร.พัชรภาพร อธิสุขนันท์ ประธานกรรมการดำเนินการสอบ และ ผศ.ดร. ปฏิภาณ
ปัญญาพลกุล ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำในด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณพี่ๆเจ้าหน้าที่ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวก
สะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้และปฏิบัติการอนุรักษ์ฟื้นฟู
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมหาชัยฝั่งตะวันออก ตำบลโคกขาม อำเภอเมือง จังหวัด
สมุทรสาครที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างกระซ้า และ โรงงานเมืองทองอุตสาหกรรมอาลูมิเนียม ที่เอื้อเฟื้อ
ตัวอย่างน้ำเสียในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอบพระคุณ ดร.สมฤดี สาธิตคุณ คุณประวีระภรณ์ สาธิตคุณ
และอาจารย์พงศกร จิวภรณ์คุปต์ ที่ช่วยติดต่อนำตัวอย่างน้ำเสียมาให้

ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อบรมสั่งสอนความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าในการทำวิจัยครั้งนี้ ภาควิชา
วิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน เป็น
แรงผลักดันทั้งกายและใจเสมอมา

ประโยชน์ที่พึงได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ทุกท่านที่มีส่วนสำคัญต่อ
ความสำเร็จของการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อนิสา ทรัพย์นิวัตต์

เมษายน 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	74
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	105

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์	40
2	ชนิดและปริมาณของเปลือกหอยที่พบในกระช้ำ	42
3	องค์ประกอบทางกายภาพของกระช้ำเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยลาย หอยแครง และหอยตลับ	43
4	องค์ประกอบทางเคมีของกระช้ำเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยลาย หอยแครง และหอยตลับ	44
5	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของกระช้ำและถ่านกัมมันต์	55
6	จลนศาสตร์ดูดซับของกระช้ำและถ่านกัมมันต์	62
7	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมเมืองทองอาลูมิเนียม	64
8	ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียม สังกะสีและทองแดงโดยใช้ถ่านกัมมันต์	65
ตารางผนวกที่		
1	องค์ประกอบของกระช้ำ	75
2	ขนาดและปริมาณของกระช้ำ	75
3	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการ ปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที	76
4	ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และ แคดเมียม ที่ความเร็วรอบ ที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ในความ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที	77
5	ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และ แคดเมียม ที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
6 ผลของน้ำหนักรีดตัวคูดซั้บที่เหมาระสมในการกำจั้ดทองแดง สั้งกะสี และ แคะเดมียม ที่พีเอชเรื่้มน้้ต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการสั้ม่ผัส 60 นาทีระยะเวลาการป้้นกวน 60 นาที	81
7 ผลของขนาดตัวคูดซั้บที่เหมาระสมในการกำจั้ดทองแดง สั้งกะสี และ แคะเดมียม ที่พีเอชเรื่้มน้้ต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวคูดซั้บ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสั้ม่ผัส 60 นาที ระยะเวลาการป้้นกวน 60 นาที	83
8 ผลของชนิดของหอยในตัวคูดซั้บที่เหมาระสมในการกำจั้ดทองแดง สั้งกะสี และ แคะเดมียม ที่พีเอชเรื่้มน้้ต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวคูดซั้บ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสั้ม่ผัส 60 นาที ระยะเวลาการป้้นกวน 60 นาที	84
9 ผลของอุณหภูมิในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ในการกำจั้ดทองแดง สั้งกะสี และ แคะเดมียม ที่พีเอชเรื่้มน้้ต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวคูดซั้บ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสั้ม่ผัส 60 นาที ระยะเวลาการป้้นกวน 60 นาที ของกระชั้	86
10 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในการกำจั้ดทองแดง สั้งกะสี และ แคะเดมียม ที่พีเอชเรื่้มน้้ต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณตัวคูดซั้บ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสั้ม่ผัส 60 นาทีระยะเวลาการป้้นกวน 60 นาที ของ กระชั้	87
11 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในการกำจั้ดทองแดง สั้งกะสี และ แคะเดมียม ที่พีเอชเรื่้มน้้ต้นของ สารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณตัวคูดซั้บ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสั้ม่ผัส 60 นาทีระยะเวลาการป้้นกวน 60 นาที ของ ถ่านกั้มันต์	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
12	ข้อมูลสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช	92
13	ความเข้มข้นที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ	95
14	ข้อมูลผลการดูดซับแคดเมียมผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์	97
15	ข้อมูลผลการดูดซับสังกะสีผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์	98
16	ข้อมูลผลการดูดซับทองแดงผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์	99
17	ข้อมูลผลการดูดซับแคดเมียมผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียจากโรงงาน	100
18	ข้อมูลผลการดูดซับสังกะสีผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียจากโรงงาน	101
19	ข้อมูลผลการดูดซับทองแดงผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียจากโรงงาน	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระเช้าบริเวณป่าชายเลนในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้และปฏิบัติการอนุรักษ์ฟื้นฟูทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมหาชัยฝั่งตะวันออก	18
2	ภาพตัดตามขวางของเปลือกหอยสองฝา	19
3	ลักษณะภายนอกของเปลือกหอยแครง (ซ้าย) รูปทรงของเปลือกหอยแครง กำลังขยาย 2000 เท่า (ขวา)	20
4	กลไกการดูดซับของสารดูดซับ	23
5	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	24
6	แบบจำลองแสดงการดูดซับบนผิวตัวดูดซับตามสมมติฐานของ Langmuir	25
7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ และ $1/C$	26
8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$	27
9	ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ	33
10	แสดงการเคลื่อนที่ของ adsorption zone สำหรับชั้นวัสดุดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลลงข้างล่างของน้ำ	34
11	แสดงลักษณะของ breakthrough curve สำหรับวัสดุดูดซับที่อยู่กับที่ตามทฤษฎี	34
12	เปลือกหอยชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในกระเช้า	42
13	รูปทรงของกระเช้าเปรียบเทียบกับเปลือก หอยลาย หอยแครงและหอยตลับ	44
14	การกระจายตัวของขนาดเปลือกหอยในกระเช้า	45
15	ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	47
16	การตกตะกอนโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ	47
17	ผลของระยะเวลาปั่นกวต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	49
18	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	ผลของปริมาณตัวดูดซับ(กระช้ำ)ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	51
20	ผลของขนาดตัวดูดซับ(กระช้ำ)ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	51
21	ผลของชนิดของเปลือกหอยในกระช้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	52
22	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์	53
23	ผลของความเข้มข้น โลหะหนักเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมโดยกระช้ำ	56
24	ผลของความเข้มข้น โลหะหนักเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมโดยถ่านกัมมันต์	56
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของกระช้ำ	57
26	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของกระช้ำ	58
27	ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์	59
28	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์	60
29	ผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำ เสียจากโรงงานเมืองทองอาลูมิเนียม	65
30	ผลการศึกษาการดูดซับสังกะสีผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสีย จากโรงงานเมืองทองอาลูมิเนียม	65
31	ผลการศึกษาการดูดซับทองแดงผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำ เสียจากโรงงานเมืองทองอาลูมิเนียม	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	การทดลองผ่านคอสม์กระช้ำ	103
2	กราฟมาตรฐานของแคดเมียม สังกะสี และทองแดง	104



การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระซ้า)

Treatment of Heavy metal Contaminated Water by Natural Mixed Shell (Krasa)

คำนำ

ปัจจุบันคุณภาพของแหล่งน้ำต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดิน หรือน้ำทะเลชายฝั่ง ในจังหวัดที่เป็นเขตอุตสาหกรรม เช่น จังหวัดสมุทรสาคร สมุทรสงคราม ได้เสื่อมโทรมลงไปมาก อีกทั้งยังมีปัญหาการปนเปื้อนสารพิษต่างๆที่เป็นอันตรายไม่ว่าจะเป็นสารที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืช สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และ โลหะหนัก เป็นต้น โดยโลหะหนักที่พบการปนเปื้อนในน้ำมากที่สุดคือ ทองแดง รองลงมาคือสังกะสี และแคดเมียม ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของการปนเปื้อนนั้นมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และแหล่งชุมชน ตัวอย่างของโรงงานที่อาจมีการปล่อยโลหะหนักเช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานฟอกย้อม เป็นต้น ซึ่งได้มีการศึกษาหาวิธีการต่างๆที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเหล่านี้ ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการดูดซับ การตกตะกอนพบปัญหาในเรื่อง ต้องเติมสารเคมีลงไปใต้น้ำเสีย และกากตะกอนที่เกิดขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย การแยกโดยใช้เยื่อแผ่น พบปัญหาในเรื่องต้องใช้แรงดันสูงเกิดการอุดตันของโลหะที่ผิวเยื่อแผ่น ต้องใช้สารเคมีล้างทำความสะอาด ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงเช่นกัน การแลกเปลี่ยนไอออน พบปัญหาในเรื่องเรซินที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนยังมีราคาแพงและนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุน ในขณะที่การดูดซับเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้งาน ในการกำจัดโลหะหนัก มีข้อดีได้แก่ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปใต้น้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวปริมาณมากเป็นผลให้ประสิทธิภาพสูง ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมชุบโลหะ ในทางปฏิบัติพบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์อาจไม่เหมาะสมมากนัก สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงๆ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ยังมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นวัสดุธรรมชาติที่เป็นของเหลือทิ้ง จึงมีความเหมาะสมมากกว่าที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในการนำวัสดุเหลือใช้ เช่น เปลือกหอยหลายๆชนิด เช่น เปลือกหอยลาย เปลือกหอยแครง และเปลือกหอยแมลงภู่ มาเป็นสารดูดซับเพื่อทำการดูดซับโลหะหนักต่างๆไว้ ซึ่งได้ผลที่ดีในระดับหนึ่ง และเมื่อมีการ

ปรับปรุงคุณภาพโดยการล้างด้วยกรด ก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดีขึ้นด้วย ในธรรมชาติเราจะพบเปลือกหอยหลายๆชนิดที่ถูกธรรมชาติทำความสะอาดจนมีสีขาวเหมือนกันหมด ซึ่งสามารถพบได้ตามป่าชายเลนหรือตามแนวชายฝั่งในจังหวัดสมุทรสาครและสมุทรสงคราม โดยมีชื่อที่ชาวบ้านใช้เรียกกันว่า “กระช้ำ” ซึ่งถ้าไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์แล้วปล่อยให้มียังจำนวนมากเกินไป ระบบนิเวศก็จะเปลี่ยนจากระบบนิเวศแบบป่าชายเลนเป็นระบบนิเวศชายหาดได้ซึ่งชาวบ้านบางส่วนก็นำมาใช้ประโยชน์ในการถมที่ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยเล็งเห็นประโยชน์ของกระช้ำที่มากกว่าการนำไปถมที่ เพราะกระช้ำเหมือนกับเปลือกหอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยธรรมชาติแล้ว ทำให้การนำมาใช้เป็นตัวดูดซับจะทำให้ไม่ต้องนำมาปรับปรุงคุณภาพอีก ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโดยนำกระช้ำมากำจัดโลหะหนักในน้ำ โดยเฉพาะชนิดโลหะหนักที่เป็นปัญหาในจังหวัดที่พบกระช้ำ เช่น จังหวัดสมุทรสาคร และสมุทรสงคราม ซึ่งได้แก่ ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม เพื่อในท้ายที่สุดแล้วจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานชุบโลหะได้ โดยทำการศึกษาองค์ประกอบของกระช้ำ ผลความเข้มข้นโลหะหนัก ความเป็นกรด-เบส ระยะเวลาในการดูดซับ นอกจากนี้ยังมีการศึกษา ไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์ของการดูดซับของกระช้ำเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และการออกแบบเพื่อนำไปใช้ในโรงงานชุบโลหะต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบของกระช้ำ
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนัก ไอโซเทอร์ม และจลนศาสตร์ของการดูดซับกระช้ำ
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีอื่นๆ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้กระช้ำ โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงาน

ขอบเขตงานวิจัย

1. กระช้ำที่ใช้ในการศึกษานำมาจากที่ ศูนย์การเรียนรู้และปฏิบัติการอนุรักษ์ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมหาชัยฝั่งตะวันออก หมู่ที่ 3 ตำบลโคกขาม จังหวัดสมุทรสาคร
2. โลหะหนักที่จะนำมาศึกษา คือ ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม
3. การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ระยะเวลา ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของโลหะหนักโดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์การทดลองดูดซับแบบเบตช์ (Batch)
4. ใช้น้ำตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ เป็นตัวแทนของน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแบบคอลัมน์

การตรวจเอกสาร

1. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 23-92 ในจำนวนธาตุทั้งหมด 105 ธาตุ ในตารางธาตุจะเป็นโลหะหนัก 68 ธาตุ จากจำนวนธาตุที่เป็นโลหะทั้งหมด 83 ธาตุ โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย ที่สนใจกันมากคือกลุ่มของ โครเมียม แมงกานีส เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี เงิน แคลเซียม และปรอท ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน (transition elements) นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ ที่อยู่ในกลุ่มของธาตุรีฟริเซ็นเตดีฟ (representative elements) คือ ตะกั่ว อาร์เซนิก ซีลีเนียม และพลวง โลหะหนักและสารประกอบโลหะหนักเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ถ้าได้รับในปริมาณมากเกินไป

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป มีสถานะเป็นของแข็ง(ยกเว้นปรอทในสภาวะปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex-compound) ได้ หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะหนักอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร(food chain) โลหะหนักหลายชนิด มีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ โลหะหนักชนิดต่างๆ เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำสามารถสะสมตัวอยู่กับตัวกลาง เช่น ดินตะกอน พืช สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งโลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้ สามารถเปลี่ยนรูปหรือถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารได้ (การดี, 2541)

จากการศึกษายังพบอีกว่าการสะสมความเป็นพิษของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามลำดับของระบบห่วงโซ่อาหาร โลหะหนักและสารประกอบของโลหะหนักสามารถสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้ (Logan and Feltz, 1985) พืชสามารถสะสมโลหะหนักได้มากตามปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีในน้ำและดินตะกอน

1.1 โลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

โลหะหนักถูกปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำโดยสาเหตุ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ ภายในแหล่งน้ำ โลหะหนักจะกระจายอยู่ในส่วนต่างๆ คือ ละลายอยู่ในน้ำ ถูกดูดซับโดยสิ่งของแขวนลอยหรือฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ รวมทั้งวัตถุหรือตะกอนในแหล่งน้ำ และสะสมไว้ภายในตัวของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ (Enk and Mathis, 1977) ส่วนที่สะสมอยู่ในตะกอนสามารถเปลี่ยนไปละลายอยู่ในน้ำได้ทั้งโดยกระบวนการทางเคมี-ฟิสิกส์ และชีวเคมี (Frenet, 1981) กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โลหะหนักแพร่ลงสู่แหล่งน้ำ โดยเฉพาะการปะปนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กิจกรรมด้านการเกษตร โดยสามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดโลหะหนักที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ออกเป็น 3 แหล่งที่สำคัญดังนี้

- แหล่งอุตสาหกรรม โดยโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำบรรยากาศ หรือตัวกลางอื่นๆ เช่น โรงงานแบตเตอรี่ และโรงงานสี จะปล่อยสารตะกั่ว โรงงานชุบเคลือบโลหะจะปล่อยโลหะแคดเมียม โรงงานหล่อพระพุทธรูป จะปล่อยโลหะสังกะสี และทองแดง และโรงงานผลิตยาปราบศัตรูพืชจะปล่อยสารปรอท (Wood, 1975) เป็นต้น

- แหล่งเกษตรกรรม ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรค่อนข้างสูงเช่น การใช้ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าเชื้อราต่างๆ แต่ส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช เช่น ยาบำบัดเชื้อราจะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบ ยาฆ่าหญ้าที่มีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบ และยาฆ่าแมลงที่มีซิลิเนียมเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น ซึ่งโลหะส่วนใหญ่นั้นจะสลายตัวได้ยากทำให้เกิดการสะสมในดิน เมื่อถูกชะล้างจะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และเกิดการปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำจนไหลลงสู่ทะเลในที่สุด จึงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน้ำ และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ

- แหล่งชุมชน ชุมชนก็เป็นแหล่งกำเนิดของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน เช่น การใช้น้ำมันที่มีสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ทำให้อากาศในเมืองที่การจราจรแออัดเต็มไปด้วยสารตะกั่ว ขยะมูลฝอยชุมชนที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักอยู่ เช่น กระดาษ ถ่านไฟฉาย สีทาบ้าน แบตเตอรี่รถยนต์ ภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ เป็นต้น (อภิชาติ, 2536)

1.2 โลหะหนักในแหล่งน้ำ

อภิชาติ (2536) กล่าวว่าสารพิษของโลหะหนักชนิดต่างๆ เมื่อมีอยู่ในแหล่งน้ำสามารถที่จะสะสมอยู่กับตัวกลาง เช่น ดิน ตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่างๆ ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่หรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้ สามารถเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสมการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำ สามารถแบ่งได้ดังนี้

การสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำ ทั้งที่อยู่ในรูปของสารละลายในน้ำ (Solution) และอยู่ในรูปแขวนลอย (suspended solid) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยและพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยจะมี residence time ยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ และจากการที่น้ำมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา มีผลทำให้ตะกอนได้น้ำลอยตัวขึ้น (resuspension) จึงมีทั้งกระบวนการดูดซับ (adsorption) และกระบวนการคาย (desorption) ของโลหะหนักระหว่างน้ำและตะกอน

ซาโรจน์และคณะ (2552) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำและตะกอนดินบริเวณชายฝั่งทะเลของอ่าวไทยตอนบน พบว่าโลหะหนักที่พบสะสมปริมาณสูงที่สุดในน้ำคือ ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ตามลำดับ ซึ่งโลหะหนักทั้ง 3 ตัวนั้นมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1.2.1 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะสีแดงส้มอยู่ในหมู่ 1B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.9 จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,730 องศาเซลเซียส ทองแดงมีเลขออกซิเดชัน 2 ค่า คือ +1 และ +2 มีความเหนียวเป็นมันวาว มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก ทนการกัดกร่อนในอากาศได้ดีกว่าเหล็ก ทองแดงบริสุทธิ์มีความอ่อนปานกลาง ไอของทองแดงเป็นสีเขียว ทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ดีกว่าออกซิเจนปกติไม่พบรูปอิสระแต่พบในรูปแร่ และสารประกอบ

การเข้าสู่ร่างกายของทองแดง ทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 2 ทางด้วยกัน คือ

- ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารที่มีธาตุทองแดงเข้าไป ซึ่งอาหารที่มีทองแดงมาก ได้แก่ ตับ (liver) เห็ด (mushroom) เนื้อสัตว์ อาหารทะเล เช่น หอยนางรม (oysters) ถั่ว และผลไม้เปลือกแข็งๆ เช่น ถั่ว (nut) เป็นต้น

- ทางเดินหายใจ โดยการหายใจเอาฝุ่นของสารประกอบทองแดงและไอทองแดงอันเกิดจากโรงงานหลอมโลหะทองแดง และโลหะผสมทองแดงเข้าไป ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจได้

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดง การสะสมของทองแดงในร่างกาย จะทำให้เกิดโรคเรื้อรังได้ เช่นเดียวกับโลหะชนิดอื่นๆ และอาจเกิดพิษเนื่องจากทองแดงแบบเฉียบพลันได้ในกรณีที่ร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินไปทันที โดยร่างกายขับออกไม่ทัน การเกิดพิษเนื่องจากทองแดง แบบเฉียบพลันนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

- การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงจากระบบทางเดินอาหาร เกิดจากการรับประทานอาหารที่มีทองแดงปะปนอยู่ปริมาณสูงเข้าไป การเกิดพิษลักษณะนี้จะทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียน และท้องร่วง นอกจากนี้ยังทำให้เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตับวาย มีเลือดออกในทางเดินอาหาร ปัสสาวะน้อยกว่าปกติ ไม่มีไนโตรเจนในเลือด (azotemia) ปัสสาวะมีโลหิต (hematuria) และโปรตีน (proteinuria) ความดันโลหิตสูง หัวใจเต้นเร็วกล้ามเนื้อมีอาการหดเกร็งอย่างรุนแรง มีอาการโคม่า และตายในที่สุด ถ้าได้รับทองแดงมากเกินไป (อภิชาติ, 2536)

- การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงในลักษณะนี้เกิดจากการที่ร่างกายได้รับสารประกอบทองแดงหรือไอทองแดงโดยการหายใจเข้าไปซึ่งทำให้เกิดการระคายเคือง และอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงในปริมาณมาก จะทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียนเป็นไข้ (metal fume fever) และบางครั้งทำให้ผมและผิวหนังเปลี่ยนสีได้ การหายใจเอาฝุ่นและสารประกอบทองแดง (dusts and mists of copper salts) ปริมาณมากพอสมควรเข้าสู่ร่างกาย จะทำให้เกิดอาการเลือดคั่งในเยื่อจมูกและช่องคอดต่อระหว่างจมูกและ

ปาก (pharynx) บางครั้งทำให้เกิดแผลทะลุใน septum ของจมูก นอกจากนี้สารประกอบทองแดงเมื่อเข้าตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ตาอักเสบ และตาขุ่นมัวได้ (สิทธิชัย,2528)

ความเป็นพิษของทองแดงในสิ่งมีชีวิต ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต เป็นส่วนประกอบของ Hemoglobin และมีความสำคัญต่อขบวนการหายใจของพืช แต่อย่างไรก็ตามสิ่งมีชีวิตต้องการทองแดงในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งถ้ามีมากเกินไปในสิ่งแวดล้อมก็จะก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ Mount (1968) รายงานว่าระดับความปลอดภัยสำหรับการสืบพันธุ์ของปลา *Pinephles promelas*. ในน้ำกระด้าง (CaCO_3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงประมาณ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในน้ำอ่อน (CaCO_3 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงต่ำกว่า โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.018-1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ทองแดงแม้จะเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสัตว์น้ำหลายชนิด เช่น พวก Mollusks และพวก crustacean โดยเป็นส่วนประกอบของ haemocyanin ในเลือด แต่ถ้าปริมาณทองแดงสูงเกินไปเล็กน้อย ก็อาจเกิดพิษต่อสัตว์น้ำได้ ในหอยนางรมเมื่อสะสมโลหะ ทองแดงไว้มากจะทำให้เหงือกและเนื้อเยื่อส่วน mantle มีสีเขียวผิดปกติ โลหะทองแดงในรูปของ CuSO_4 อาจทำให้เกิดตะกอนกับสิ่งที่เหงือกปลาขับออกมาและมีผลทำให้ปลาตายได้ เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ผิดปกติและสารดังกล่าวยังทำลายเซลล์ที่อยู่ตามเหงือกปลาอีกด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อตัวอ่อนของปลาอีกด้วย (อรพินท์,2550)

แหล่งปนเปื้อนของทองแดงในสิ่งแวดล้อม ทองแดงในธรรมชาติ ทองแดงเป็นสินแร่ที่มีมากในธรรมชาติเช่นเดียวกับสังกะสี พบว่ามักจะอยู่ปะปนกับแร่สังกะสี ในธรรมชาติพบทองแดงในรูป chalcopyrite (CuFeS_2), chalcocite (Cu_2S), malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), azurite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) นอกจากนี้ยังพบในรูปของ cuprite (Cu_2S) รูปแบบสารประกอบเคมีของทองแดงมีหลายรูปแบบทั้งอยู่ในรูปคลอไรด์ซัลเฟต ไนเตรทซึ่งมีความสามารถนำการละลายน้ำได้ดี ส่วนสารประกอบที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ และซัลไฟด์จะไม่ละลายน้ำ โดยทองแดงในน้ำผิวดินปกติมีความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (McNeely *et al.*,1979) ในสภาพธรรมชาติ แร่ทองแดงอยู่ในรูปของซัลไฟด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งแร่เหล่านี้จะสลายตัวได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่เป็นกรด ทำให้ทองแดงถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะหนักทั่วไป ทองแดงจึงจัดว่าเป็นพวกที่เคลื่อนที่ได้ดี แต่เมื่อหินหรือแร่เหล่านี้กลายสภาพมาเป็นดิน ทองแดงเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับแร่อินทรีย์สารในดินได้ง่ายจึงสามารถ

ตกตะกอนได้กับแอนไอออนหลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ทองแดงจึงจัดเป็นพวกที่ค่อนข้างไม่เคลื่อนที่ในดิน รูปที่ละลายได้ของทองแดงที่พบมากที่สุดคือ Cu^{2+}

ทองแดงและสารประกอบของทองแดงพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมต่างๆ แต่พบมากในแหล่งน้ำดิบ ซึ่งชนิดของทองแดงที่เกิดขึ้นในน้ำขึ้นอยู่กับค่า pH และความเข้มข้นของคาร์บอเนตในน้ำ และชนิดของไอออนลบที่ปรากฏอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปในสารประกอบของทองแดงมักมีเลขออกซิเดชัน +1 (Cu^+) และ +2 (Cu^{2+}) เรียกว่า cuprous และ cupric ตามลำดับ Cu^+ มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนรูปเป็น Cu^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรมากกว่าเมื่อละลายอยู่ในน้ำ

การแพร่ของทองแดงในสิ่งแวดล้อม ทองแดงที่เกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมมีมากเนื่องมาจากการใช้ยากำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าเชื้อรา และจุลินทรีย์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำเป็นส่วนใหญ่ ได้มีการศึกษากันมากเกี่ยวกับระดับของทองแดงในสัตว์น้ำต่างๆ Eisenberg and Topping (1980) พบว่า ในหอยนางรม หอยกาบ และปูในอ่าว Chesapeake มีระดับทองแดงโดยเฉลี่ย 2.6, 5.3 และ 5.9 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ Howarth and Spraguen (1978) ได้ทำการทดลองพบว่า ทองแดงจะจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนนอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิ ความกระด้างของน้ำ ปริมาณออกซิเจนตลอดจนความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ล้วนมีผลกระทบต่อการสะสมของทองแดงในเนื้อปลา rainbow trout การนำทองแดงมาใช้ประโยชน์ ทองแดงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น มากกว่าร้อยละ 50 ของทองแดงใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือที่ใช้สายไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า อุตสาหกรรมการชุบและเคลือบโลหะ ทำลวดตัวนำไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมทอผ้า ผลิตภัณฑ์เซรามิก โลหะเจือจางหรือในรูปแบบของสารประกอบ เช่น สลิกจุนสี (CuSO_4) ที่ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อรานอกจากนี้ยังใช้สารประกอบทองแดงในการกำจัดสาหร่ายและหอยที่ไม่มีประโยชน์ในแหล่งน้ำ (Gauss *et al.*, 1985)

1.2.2 สังกะสี

แร่สังกะสีมีอยู่ทั่วไปในเปลือกโลก โดยปกติจะอยู่ในรูปของแร่ซัลไฟด์ (ซิงค์เบลนด์) และคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังพบในรูปของวิลเลียมท์ (willemite, Zn_2SiO_4) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งโดยปกติแล้วจะพบแคดเมียมปะปนอยู่กับสังกะสีด้วย แต่มีจำนวนเล็กน้อย (Reilly, 1980)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่เดียวกับปรอท และแคดเมียม มีเลขมวล 65.38 เลขอะตอม 30 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 มีจุดหลอมเหลว 419 องศาเซลเซียสมีจุดเดือด 907 องศาเซลเซียส หลอมเหลวง่าย กลึงไสเข้ารูปง่าย สีขาว ทนทานต่อการเกิดสนิมปกติเป็นโลหะที่มีความแข็งแต่เปราะ ไม่สามารถตัดให้โค้งงอตามรูปร่างที่ต้องการได้ และเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำจึงไม่คงตัวในธรรมชาติ เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ความสามารถในการละลายของแร่สังกะสีชนิดต่างๆ จะลดลงตามลำดับ ดังนี้ $Zn(OH)_2$ (amorph) > α - $Zn(OH)_2$ > β - $Zn(OH)_2$ > γ - $Zn(OH)_2$ > ϵ - $Zn(OH)_2$ > $ZnCO_3$ (smithsonite) > ZnO (zincite) > Zn_2SiO_4 (willemite) > Soil-Zn > $ZnFe_2O_4$ (franklinite)

การนำไปใช้ประโยชน์

ก. โลหะสังกะสีใช้ในการเคลือบเหล็กไม่ให้ขึ้นสนิม ทำเป็นทองเหลือง (โลหะผสมของสังกะสีกับทองแดง) และแผ่นสังกะสีใช้มุงหลังคา (Berman, 1980)

ข. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใช้ทำสีขาวในอุตสาหกรรมเซรามิกส์และสีทา

ค. ซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) ใช้ในอุตสาหกรรมยาและเกษตรกรรม เช่น คาลาไมลอสันสำหรับรักษาอาการคันของผิว เป็นต้น

ง. ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และใช้เตรียมสารประกอบสังกะสีอื่นๆ เช่นซิงค์ออกไซด์ ซิงค์คาร์บอเนต เป็นต้น

จ. ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ใช้ทำสีขาวในอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นฉากเรืองแสงในโทรทัศน์หลอดฟลูออเรสเซนต์และองค์ประกอบในสีพรายน้ำ

ฉ. ซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมการทำยาง

ช. ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ใช้ป้องกันเชื้อราในอุตสาหกรรมกระดาษและ ไม้อัด

ซ. ซิงค์ไพริดีนไธโอน (zinc pyridinethione) ใช้เป็นส่วนผสมในการป้องกันรังแคในอุตสาหกรรมการผลิตแชมพูสระผม

การเข้าสู่ร่างกายของสังกะสี สังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางด้วยกันดังนี้

- ทางเดินหายใจ สังกะสีที่เข้าสู่ทางเดินหายใจมักอยู่ในรูปของสังกะสีออกไซด์ และสังกะสีคลอไรด์ ซึ่งเกิดขึ้นจากงานเชื่อม บัดกรีโลหะ ตัดโลหะที่เชื่อมด้วยสังกะสี งานหลอม และหล่อทองแดง เป็นต้น

- การสัมผัสทางผิวหนัง
- ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารที่มีธาตุสังกะสีเข้าไป เช่น ดับ การเกิดพิษเนื่องจากสังกะสี

สังกะสีก่อให้เกิดการแตกหักของโครโมโซม และความผิดปกติของการแบ่งเซลล์(mitotic poison) ที่ระดับความเข้มข้นของสังกะสี 20 มก./ลิตร และ 30 มก./ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายอย่างฉับพลัน (dangerous substance)

สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ สัตว์และพืชบางชนิด แต่ในปริมาณไม่มากนักเนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญของเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์ carbonicanhydrase, alcohol dehydroginase ความเป็นพิษของสังกะสี จะเกิดจากการที่ได้รับสังกะสีหรือสารประกอบของสังกะสีเข้าไปในปริมาณมาก สำหรับในพลาสมาของคนปกติจะมีระดับสังกะสีอยู่ประมาณ 85-100 ppb (Davies, 1980) ความเป็นพิษของไอออนสังกะสีอิสระ จะปรากฏรุนแรงขึ้น โดยการเพิ่มพีเอชและลดความเป็นพิษลงเมื่อความกระด้างเพิ่มขึ้น ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีมากเกินไป จะเกิดอาการผิดปกติ เช่น ปวดท้อง อาเจียน คลื่นไส้ ซ็อกความต้านทานโรคต่ำกว่าปกติ บาดแผลปิดยาก และอาจถึงตายได้ (Berman, 1980) สังกะสีออกไซด์ที่เป็นผงฝุ่นละออง ทำให้เป็นไข้ได้ ซึ่งเรียกว่า metal fume fever หลังจากได้รับผงฝุ่นละอองเข้าไป 24 – 48 ชั่วโมง (Goyer, 1996)

การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร การกินสังกะสีเข้าไปจะไปกักร่อนบริเวณทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหารและกระเพาะอาหาร ทำให้มีอาการอักเสบและปวดอย่างรุนแรงเมื่อหายแล้วอาจทำให้ทางเดินอาหารตีตันได้

การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ การสูดดมเอาสังกะสีเข้าไปทำให้เกิดอาการคล้ายไข้หวัดใหญ่ โดยเริ่มจากอาการคลื่นไส้ ปวดศีรษะ มีไข้สูง ปวดเมื่อยตามกล้ามเนื้อ ไอเหนื่อย เหงื่อออก และหนาวสั่น รู้สึกรสของโลหะ ซึ่งมักเกิดขึ้น 4-12 ชั่วโมงหลังการสัมผัส ตามมาด้วยการมีไข้สูง เหงื่อออก และหนาวสั่น อาการดังกล่าวจะหายเป็นปกติภายใน 1-2 เรียกชื่อโรคนี้อาโรคไข้วันจันทร์ (Monday fever) หรือโรคไข้พิษโลหะ (metal fume fever)

แหล่งปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

ก. สังกะสีในดิน ปริมาณสังกะสีในดินโดยทั่วไปมีน้อยมาก กล่าวคือเปลือกโลกมีสังกะสี 65-80 ppm หินทั่วไปมีสังกะสี 130 ppm และในดินมีสังกะสี 40-58 ppm (Hodgson,1963)

ข . สังกะสีในอากาศ ได้มีการคาดการณ์ว่าในปี 1975 ปริมาณสังกะสีที่ธรรมชาติจะปล่อยสู่อากาศมีค่าประมาณ 43.7×10^6 กิโลกรัม และปริมาณสังกะสีที่มนุษย์ปล่อยสู่อากาศมีค่าประมาณ 315×10^6 กิโลกรัม (Nriagu, 1980)

ค. สังกะสีในแหล่งน้ำ (Bruland *et al.*,1978) พบว่าปริมาณสังกะสีในมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่า 1×10^{-5} mg/l ที่ระดับผิวน้ำ ถึง 6×10^{-4} mg/l ที่ระดับความลึก 3,000 เมตรและแหล่งน้ำธรรมชาติในแคริฟลอเรียเหนือมีสังกะสี 0.2×10^{-3} - 0.6×10^{-3} mg/l

1.2.3 แคดเมียม

แคดเมียม (Cd) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน โดยมีเลขอะตอม 48 มวลอะตอม 112.40 มีจุดหลอมเหลวที่ 321 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ 765 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 2+ แคดเมียมเป็นโลหะอ่อน สีเงิน ตัดง่าย และตีแผ่ได้ ละลายได้ในกรด โดยเฉพาะกรดไนตริก และละลายได้มากในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท

ในธรรมชาติจะพบแคดเมียมในปริมาณที่น้อยประมาณ 0.1 ถึง 0.2 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ โดยจะพบอยู่ในรูปของสินแร่ greenockite (CdS) และปะปนอยู่กับสินแร่อื่น ๆ เช่น พรอท ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ซึ่งจะพบอยู่ในรูปสินแร่สังกะสีประมาณร้อยละ 0.3 ถึง 1.0 และอาจมากถึงร้อยละ 3 เช่น ปะปนอยู่กับสินแร่ sphalerite (ZnS) หรือ calamine ($ZnCO_3$) ในหินอัคนีและหินแปรมีแคดเมียมไม่เกิน 1 ส่วนในล้านส่วน ส่วนหินตะกอนมีแคดเมียมอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 ส่วนในล้านส่วน ดังนั้นแคดเมียมที่อยู่ในดินชนิดต่าง ๆ จึงมีปริมาณแคดเมียมที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของดินนั้นสลายมาจากหินชนิดใด เช่นดินที่สลายจากหินอัคนีจะมีแคดเมียมประมาณ 0.1 ถึง 0.3 ส่วนในล้านส่วน ดินที่สลายจากหินแปรมีแคดเมียมประมาณ 0.1 ถึง 1 ส่วนในล้านส่วน และดินที่สลายจากหินตะกอนมีแคดเมียมประมาณ 0.3 ถึง 11 ส่วนในล้านส่วน ในแหล่งน้ำธรรมชาติมีแคดเมียมในช่วง 0.5 ถึง 14.6 ส่วนในล้านส่วนในบุนทรีย์ก็มี

แคลเซียมอยู่เช่นกัน ซึ่งประมาณว่าบุหรี 1 มวนจะให้แคลเซียม 1.3 ไมโครกรัม โดยส่วนใหญ่จะปะปนอยู่กับควันทูบหรี และบางส่วนจะเข้าสู่ร่างกายของผู้สูบบุหรีนั้น

การนำมาใช้ประโยชน์ แคลเซียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร โดยเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารกำจัดวัชพืช สารกำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต ทางด้านอุตสาหกรรม แคลเซียมถูกใช้ในอุตสาหกรรมทำสีทาบ้าน สีชุบโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ทำหน้าที่เป็น Stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก นำมาทำเป็นโลหะผสมกับอลูมิเนียม โปรท แมกนีเซียม นิกเกิล แพลตตินัม เป็นต้น ซึ่งจะนำไปทำท่ออง เครื่องป้องกันไฟฟ้า หลอม ส่วนประกอบของรถยนต์ แบตเตอรี่ โลหะบัดกรี ลวดโทรศัพท์ นอกจากนี้แคลเซียมยังถูกใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยโลหะที่ถูกชุบแล้วจะนำไปใช้ทำน็อต ตะปู แหนบ เป็นต้น

การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม แคลเซียมสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมทั้งจากธรรมชาติ ได้แก่ การระเบิดของภูเขาไฟ และการพังทลายหรือสึกกร่อนของเปลือกโลกหรือหินต้นกำเนิด จากการเกษตรโดยการใช้สารปราบศัตรูพืช โดยดินในการเกษตรนั้นพบว่ามีแคลเซียมเฉลี่ย 0.88 ส่วนในล้านส่วน แต่ส่วนใหญ่แคลเซียมมาจากการใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การทำเหมืองสังกะสี เนื่องจากแคลเซียมมักปะปนอยู่กับสินแร่สังกะสี ดังนั้นบริเวณใกล้ ๆ กับเหมืองสังกะสีจึงมีแคลเซียมในดินมาก โดยอยู่ในช่วง 1 ถึง 25 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนี้อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง แบตเตอรี่ โลหะผสม และการชุบโลหะได้ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของแคลเซียมสู่บรรยากาศ ดิน และแหล่งน้ำเช่นเดียวกัน สำหรับกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การสูบบุหรี ทำให้แคลเซียมแพร่กระจายออกสู่บรรยากาศ และตัวผู้สูบเอง การกำจัดขยะอย่างไม่ถูกสุขลักษณะ ซึ่งโดยส่วนใหญ่วัสดุอุปกรณ์เกือบทุกชนิดมีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบอยู่ บริเวณที่กำจัดขยะจึงมีแคลเซียมสลายตัวออกมาจากวัสดุต่าง ๆ และแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ในที่สุด

ความเป็นพิษ แคลเซียมก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์ได้มาก แต่สำหรับพืชที่สะสมแคลเซียมมักไม่แสดงอาการเป็นพิษ โดยเมื่อเข้าสู่ร่างกายแคลเซียมจะยับยั้งการทำงานของระบบเอนไซม์ โดยรบกวนการทำงานของเอนไซม์และโปรตีนที่มีโลหะประกอบ (metallo-protein, metallo-enzyme) และฟอสโฟลิปิด (phospholipids) เช่น สามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ carboxypeptidase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของเพปไทด์ (peptide) ความเป็นพิษของแคลเซียมในมนุษย์จะมีผลทั้งเฉียบพลัน และเรื้อรัง โดยเข้าสู่ร่างกายโดยทางระบบทางเดินหายใจ และระบบทางเดินอาหาร ใน 1 วัน แคลเซียมจะถูกเก็บสะสมในร่างกายประมาณ 10 ถึง 30

ไมโครกรัม และจะสะสมในร่างกายในปริมาณที่มากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีการประมาณว่าคนทั่วไปที่มีอายุ 50 ปี มีแคดเมียมสะสมในร่างกาย 10 มิลลิกรัม ถึง 60 มิลลิกรัม ขึ้นกับโอกาสที่คนนั้นจะได้รับแคดเมียมจากแหล่งต่าง ๆ ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมจะทำให้เกิดอาการปวดหัว ปวดท้องอย่างแรง เสมหะมาก เจ็บหน้าอก หายใจไม่ออก อาเจียน อาจทำให้ช็อค หมดสติและตายได้ภายใน 24 ชั่วโมง หรือภายใน 1 ถึง 2 สัปดาห์ สำหรับความเป็นพิษเรื้อรังเนื่องจากได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดผลเสียต่อการสร้างกระดูก โดยจะไปลดการสะสมของแคดเมียม ทำให้กระดูกผุกร่อน เสียวรูป และทำให้เจ็บปวดมาก เรียกอาการลักษณะนี้ว่า โรคอิตไต-อิตไต (Itai-Itai) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง ไตทำงานผิดปกติ ปอด ตับ ตับอ่อน ระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาทส่วนกลาง และเส้นประสาทถูกทำลาย (พรพิมล, 2542)

2. การกำจัดโลหะหนัก

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิต มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณโลหะหนักซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมออกจากน้ำเสีย ด้วยวิธีการบำบัดทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งมีหลายวิธี เช่น

2.1 การบำบัดน้ำเสียโดยเคมี

เป็นวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเสียโดยเติมสารเคมีลงไป มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดโดยวิธีอื่นได้ วิธีการบำบัดโดยวิธีเคมี ได้แก่

- การปรับสภาพกรด-ด่าง (pH adjustment) เป็นการปรับสภาพกรด-ด่าง ของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานพีเอชของน้ำเสียไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการบำบัดต่อไป หลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียเป็นกรดก็จะปรับด้วยสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (lime, CaOH₂) เป็นต้น ตรงข้ามกันถ้าน้ำมีฤทธิ์เป็นด่างจะปรับด้วยสารเคมีประเภทกรด เช่น กรดเกลือ (HCl) กรดกำมะถัน(H₂SO₄) เป็นต้น

- การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) เป็นการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำ เพื่อให้ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนและมีน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้น สารเคมีที่ใช้เดิม

มีหลายชนิดเช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมซัลไฟด์ สารส้ม เพอริกคลอไรด์ เพอริกซัลเฟต เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่ pH ต่างๆ ส่วนตะกอนหรือสลัดจ์ (sludge) ที่ได้จะมีส่วนของโลหะหนักที่ต้องนำไปบำบัดต่อ

- การดักจับโดยสารคีเลท (chelation) โดยอาศัยหลักการสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ สารคีเลทหรือโพลีเมอร์ที่เป็นตัวดักจับมีไอออนหรือโมเลกุลที่เรียกว่าลิแกนด์ (ligand) มีการดักจับเกิดพันธะโคเวเลนต์ ลิแกนด์จะต้องมีอย่างน้อย 2 อะตอม ที่สามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับโลหะในทางเดียวกัน เช่น อะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน เป็นต้น สารที่เป็น chelating agent ได้แก่ 1,2 ไดอะมีโนเอทาน ($\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$) ซึ่งหมู่เอมีน 2 หมู่จับกับไอออนของโลหะหนัก แคดเมียม โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก เป็นต้น

- การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (chemical oxidation) คือ เป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนต์ (oxidant) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสียสารออกซิแดนต์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ค้างทับทิม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และคลอรีน เป็นต้น

- การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) หลักการคือไอออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับไอออนเรซิน (resin) ซึ่งมีทั้งเรซินชนิดไอออนลบและไอออนบวก โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่นการใช้เรซินที่มีไอออนลบกับน้ำเสียจากการชุบโลหะที่มีโลหะหนักประเภทประจุบวก เป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างกรด

- การใช้ไฟฟ้า (electrodialysis) อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นไฟฟ้าภายในมีแผ่นเรียบกรอง (membrane) 2 ชนิด ทั้งที่เป็นเยื่อประจุลบและประจุบวก อุปกรณ์สามารถแยกไอออนจากน้ำเสียทั้งประจุบวกและประจุลบได้ ซึ่งยอมให้ประจุที่เหมือนกันไหลผ่านแต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยากทำให้แยกโลหะหนักออกได้ เช่นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากการชุบโลหะ การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นต้น

2.2 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีฟิสิกส์

เป็นการนำหลักการทางฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น

- การกรอง (filtration) การกรองน้ำอาศัยหลักการอัดน้ำเสียด้วยความดันสูงผ่านวัสดุกรองของแข็งที่ไม่สามารถเล็ดลอดช่องกรองได้จะถูกดักไว้ การกรองมีหลายแบบ เช่น การกรองที่มีช่องกรองละเอียด (microfiltration) การกรองโดยวิธีออสโมซิสกลับ (reverse osmosis) และการกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก (ultrafiltration) ระบบกรองนี้มักใช้ในการแยกสารแขวนลอยที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

- การทำให้แห้ง (drying) การทำให้น้ำระเหยแห้งนี้อาจทำได้โดยการใช้แสงแดดหรือการให้ความร้อนโดยตรงเพื่อระเหยน้ำออกไป ให้เหลืออยู่แต่ของแข็ง เช่น การตากตะกอนให้แห้งโดยใช้แสงแดดเป็นต้น

- การกลั่น (distillation) เป็นการแยกสารที่มีจุดเดือดไม่เท่ากัน ของสารที่รวมกันอยู่ออกจากกัน

- การดูดซับหรือการดูดติด (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของไหลหรือคอลลอยด์ (colloid) เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็ง และของไหลนั้นโดยสารดูดซับ (adsorbate) เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และยังมีสารดูดซับหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) เบนโทไนต์ (bentonite) และดินเหนียวกัมมันต์ (activated clay) แต่มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ มากกว่าสารดูดซับอื่นเพราะบำบัดกลิ่น สี และโลหะหนักในน้ำได้ดี

- การหมุนเหวี่ยง (centrifuge) โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง น้ำเสียจะถูกเหวี่ยงโดยหมุนด้วยความเร็วสูง ของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะสูง จะถูกเหวี่ยงออกไปรอบนอก วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง

- การแยกตัวด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) หลักการโดยใช้สารสกัด (extractant) ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายสารที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากนั้นจึงแยกสารสกัดที่มีสาร

ถูกสกัดละลายอยู่ออกไป เช่น โดยวิธีกลั่น เป็นต้น วิธีนี้อาจได้สารละลายอยู่ในน้ำเสียนกลับมาใช้ใหม่ (อภิชาติ,2536)

3. กระจ้ำ

กระจ้ำเป็นภาษาถิ่นของชาวบ้าน ที่ตั้งบ้านเรือนอาศัยอยู่บริเวณที่ราบฝั่งทะเล ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบอาชีพประมง ใช้เรียกซากหรือเปลือกหอยตามธรรมชาติ ที่ถูกน้ำทะเลพัดพาขึ้นมากองทับถมอยู่ตามหาด และชายฝั่งทะเลแล้วค่อย ๆ แปลสภาพไปตามกาลเวลา จากการเสียดสี ผุกร่อน จนกลายเป็นดินในที่สุด ลักษณะของกระจ้ำที่พบจะเป็นเปลือกหอยทั้งหมดที่มีขนาดใหญ่เล็กแตกต่างกัน ส่วนใหญ่จะเป็นเปลือกหอยสีขาวจึงเรียกว่ากระจ้ำขาว หอยที่พบเช่น หอย เสียบ หอยกระจุก หอยตลับ หอยแครง หอยกระจก (กรมส่งเสริมวัฒนธรรม,2555)

กระจ้ำจะพบตามบริเวณที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก ที่มีน้ำทะเลท่วมถึง ที่จังหวัดสมุทรสาคร (ภาพที่ 1) พบกระจ้ำที่บริเวณ ตำบลนาโคก ตำบลบ้านบ่อ ที่บริเวณวัดกระจ้ำขาว วัดกำพร้าว วัดบางหญ้าแพรก อำเภอเมืองสมุทรสาคร

กระจ้ำเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ไม่มีผู้ใดเป็นเจ้าของ ดังนั้นประชาชนในบริเวณใกล้เคียง หรือผู้ที่ความประสงค์จะนำกระจ้ำไปใช้ประโยชน์ก็สามารถเข้าไปเก็บได้ในบริเวณริมฝั่งทะเล ส่วนชาวบ้านที่อยู่ในชุมชนที่มีกระจ้ำมาก ๆ ก็ประกอบอาชีพ โดยนำทรัพยากรที่มีในท้องถิ่นมาใช้ให้ประโยชน์ เก็บกระจ้ำที่ถูกซัดมาจากน้ำทะเล บรรจุใส่กระสอบเพื่อจำหน่าย บางคนก็นำมาจัดตกแต่งสวน หรือประดับตามโคนต้นไม้ นิยมมากที่บริเวณวัดและสถานที่ท่องเที่ยวทั่วไป แต่ก่อนนำมาใช้งานต้องนำกระจ้ำมาล้างน้ำให้สะอาดเสียก่อนมิฉะนั้นความเค็มของน้ำทะเลที่ติดมากับกระจ้ำ จะส่งผลเสียต่อต้นไม้ที่ปลูกได้ หรือนำมาใช้ถมที่ในการปลูกสร้างบ้านเรือน ซึ่งคงความแน่นเกาะติดเช่นเดียวกับทราย



ภาพที่ 1 กระช้ำบริเวณป่าชายเลนในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้และปฏิบัติการอนุรักษ์ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมหาชัยฝั่งตะวันออก

4. เปลือกหอย

หอยเป็นสัตว์ที่อยู่ในไฟลัมมอลลัสกา ปกติแล้วสัตว์ในไฟลัมนี้ประกอบด้วยหอย ปลาหมึก และลึนทะเล เป็นต้น สัตว์ที่อยู่ในไฟลัมนี้มีประมาณ 100,000 ชนิด นับว่ามากเป็นอันดับสองรองจากแมลง มีลำตัวอ่อนนุ่มและเป็นเมือกใส ซึ่งลักษณะดังกล่าวได้นำมาตั้งชื่อไฟลัม คือ Mollusc และเนื่องจากมีลำตัวอ่อนนุ่มจึงจำเป็นต้องมีเปลือกแข็งห่อหุ้มลำตัวไว้อีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นหอยโดยทั่วไปจึงมีเปลือกแข็งหุ้ม (บพิช และ นันทพร, 2540) หอย เช่น หอยแครงมักพบบริเวณพื้นที่ท้องทะเลชายฝั่งตื้น ๆ ที่เป็นโคลนเหลว พบมากที่จังหวัดชลบุรีสมุทรสงคราม สมุทรสาคร เพชรบุรี สุราษฎร์ธานี และปัตตานี (สมพร และ สมโภชน์, 2535) ส่วนปริมาณผลผลิตของหอยแครง พบว่าจากการสำรวจของกองเศรษฐกิจ กรมประมง พบว่าผลผลิตหอยแครงในปี 2541 มีการเพาะเลี้ยงหอยแครงได้ผลผลิตเป็น 44,140 ตัน (กลุ่มสถิติและสารสนเทศการประมง, 2543) ทำให้เปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติถูกทิ้งเป็นของเสียจำนวนมาก

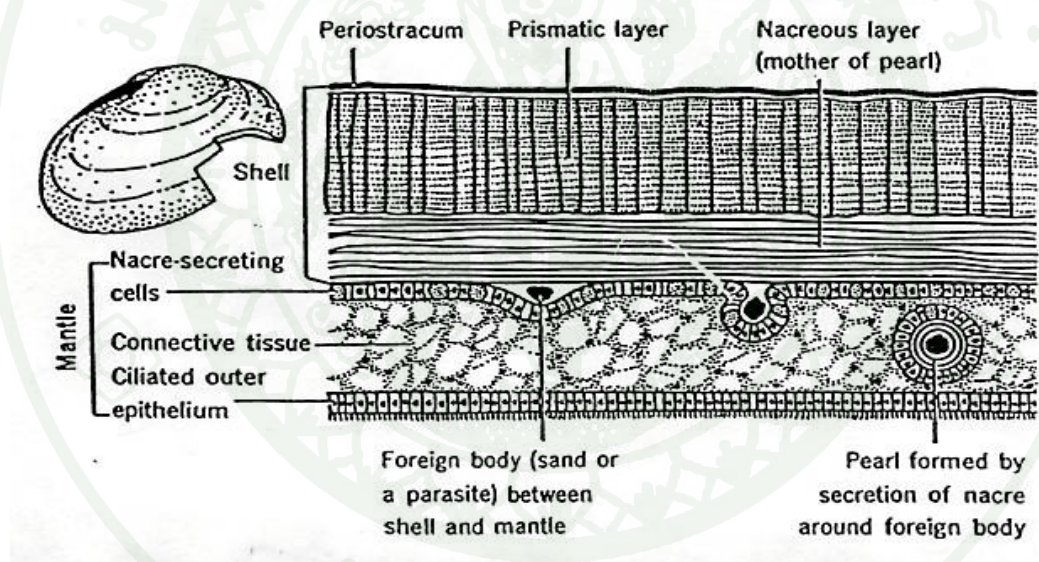
4.1 โครงสร้างของเปลือกหอย

หอย สามารถแบ่งได้เป็น หอยฝาเดียว และหอยสองฝา ซึ่ง เปลือกหอยเกิดขึ้นตั้งแต่หอยยังเป็นตัวอ่อนระยะเวลิเจอร์ (Veliger) และเมื่อหอยเจริญเติบโต จะสร้างเปลือกเพิ่มขึ้นตามขนาดของลำตัวที่เพิ่มขึ้น เปลือกที่สร้างเพิ่มขึ้นในช่วงหลังนี้สร้างจากเยื่อแมนติล (Mantle) เปลือกของหอยสองฝา ประกอบด้วยชั้นของเปลือก 3 ชั้น (ภาพที่ 2) เรียงจากนอกสุดเข้าไป เป็นดังนี้ (บพิช และ นันทพร, 2540)

1) เพอริโอสตราคัม (Periostracum) เป็นชั้นนอกสุดเป็นแผ่นบางมีสี ส่วนประกอบทางเคมีเป็นสารโปรตีนที่แข็งเหมือนโปรตีนของเขาสัตว์ มีชื่อเฉพาะว่า คอนคิโอลิน (Conchiolin)

2) ปริสมติก (Prismatic) เป็นชั้นกลางมีความหนามากกว่าชั้นอื่น ส่วนประกอบทางเคมีเป็นผลึกทรงสูงของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) อัดตัวกันแน่นมาก และเรียงตั้งฉากกับชั้นแรก นอกจากนี้ยังพบผลึกของ Calcite Aragonite ในชั้นนี้อีกด้วย

3) เนครีอัส (nacreous) เป็นชั้นในสุดเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบาง และมันวาวเรียงซ้อน ๆ กัน เรียกว่า ชั้นมุก เพราะเป็นบริเวณที่มีการสร้างมุก (Pearl)



ภาพที่ 2 ภาพตัดตามขวางของเปลือกหอยสองฝา (Booolotain and Stiles ,1979)

4.2 คุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของเปลือกหอย ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยที่ CaCO_3 ในเปลือกหอยมีโครงสร้างผลึกแบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

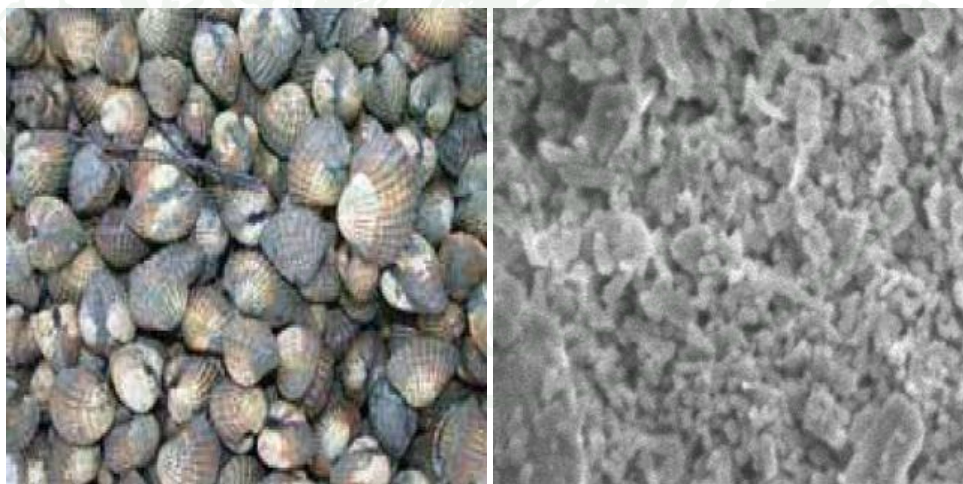
1) แคลไซต์ (Calcite) มีลักษณะผลึกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่มีหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้าหรือที่เรียกว่า Rhombohedron มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 มีความแข็งปานกลางซึ่งได้จากหินปูน หินอ่อน และเปลือกหอย

2) อะราโกไนท์ (Aragonite) มีลักษณะผลึกเป็นแท่งปริซึมหรือแท่งพริรามิดคู่ เรียกว่า Orthorhombic ซึ่งมักจะเกิดการรวมตัวกันมีรูปร่างคล้ายดอกกุหลาบ มีความถ่วงจำเพาะ 2.93 และมีความแข็งมากกว่าแคลไซต์ เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นแคลไซต์ พบในเปลือกหอยต่าง ๆ

3) วาเทอไรท์ (Vaterite) มีลักษณะผลึกทรงกลม

4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกหอย

คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกหอย ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่นและรูพรุน ได้มีศึกษาเปลือกหอยแครงพบว่ามีความหนาแน่นที่ผิวจำเพาะ 11.15 ตารางเมตรต่อกรัม และความหนาแน่น 0.995 กรัมต่อมิลลิเมตรและขนาดรูพรุนของเปลือกหอยแครง มีค่าเป็น 6,000 – 15,000 อังสตรอมดังแสดงในภาพที่ 3 (พรพิมล,2547)



ภาพที่ 3 ลักษณะภายนอกของเปลือกหอยแครง (ซ้าย) รูพรุนของเปลือกหอยแครง กำลังขยาย 2000 เท่า (ขวา)

4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอย

เปลือกหอย มีสารประกอบพวกคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก ประมาณร้อยละ 60 - 99 โดยน้ำหนัก และจากการศึกษาองค์ประกอบโดยละเอียดโดย X - Ray Fluorescence พบว่าในเปลือกหอยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมินา ซิลิกอนไดออกไซด์ และเฟอร์รัสออกไซด์ (Gachter and Muller, 1990 และ พรพิมล, 2547) นอกจากนี้จะมีสารประกอบประเภทสารอินทรีย์ในเปลือกหอยจากการศึกษาจากเทคนิค X - Ray Diffraction จะพบสารประกอบของอัลฟา และเบต้า เคราติน (α และ β Keratin) และ จากการวิเคราะห์ทางเคมีจะพบสารประเภทโปรตีนและแป้ง (Wilbur, 1964)

5. การดูดซับหรือการดูดติดผิว(adsorption)

5.1 หลักการ

การดูดติดผิว (adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดติดผิว (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดติดผิว เรียกว่า วัสดุดูดติดผิว (adsorbent) (มันสิน, 2538) การดูดติดผิวมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดติดผิวในการกำจัด มีด้วยกันหลายชนิด เช่น สี กลิ่น ซีโอดี บีโอดี ยาฆ่าแมลง โลหะหนัก เป็นต้น การดูดติดผิวเป็น กระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพคือต้องการพื้นที่น้อยไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ (Metcalf and Eddy, 1991)

การดูดติดผิวที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Eckenfelder, 1981)

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงวันเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (orientation) การกระจายตัว (dispersion) และการเหนี่ยวนำ (induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุลคือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลไม่มีขั้วการดูดติดผิวจะเกิดแบบกระจายตัวทำให้พลังงานของระบบลดลงระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลเข้ามาเกาะติดได้ (Eckenfelder, 1981)

การดูดติดผิวทางเคมี เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดติดผิวและวัสดุดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบเคมี ซึ่งแตกต่างจากการดูดติดผิวแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีการถ่ายเทมวลสารส่งผลทำให้เกิดการดูดติดผิวด้วยพันธะเคมีกับส่วน active ของวัสดุดูดติดผิว ปกติแล้ว การดูดติดผิวทางเคมีนี้จะมีพลังมากกว่าแรงวันเดอร์วาลส์ของการดูดติดผิวทางกายภาพ (Eckenfelder, 1981) สารที่มีความสามารถในการดูดติดผิวมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท (มันสิน, 2538)

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวตเต็ดซีลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 20 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากอย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุดูดติดผิวประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุดูดติดผิวที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 600 - 1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อจำกัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

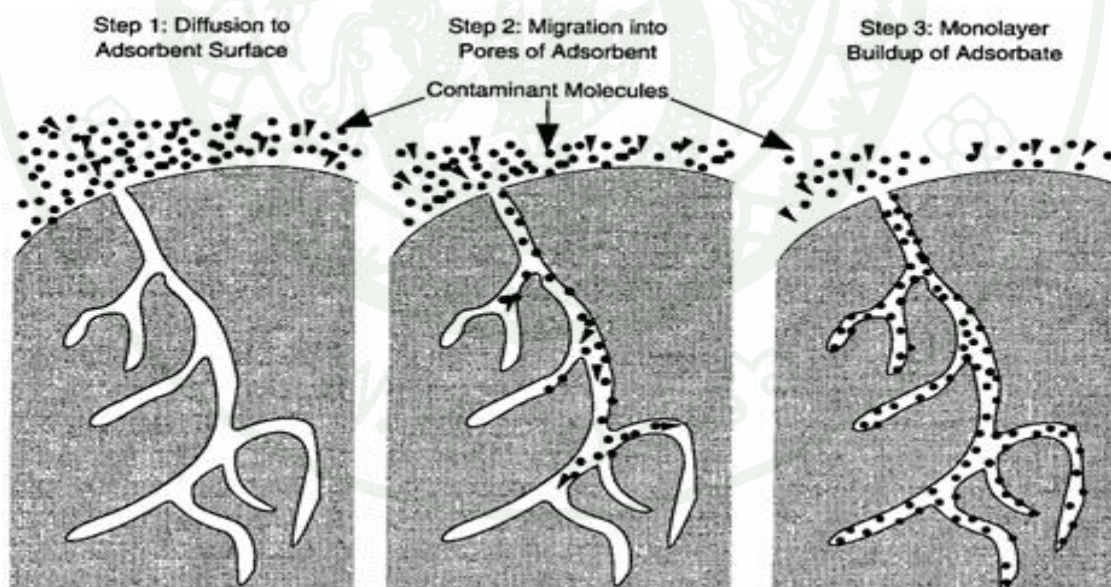
5.2 กลไกการดูดซับและอัตราการดูดซับ

5.2.1 กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (ภาพที่4) ดังนี้ (Faust and Aly, 1987)

1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าสู่วัสดุดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าสู่วัสดุดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าสู่อช่องว่างวัสดุดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะดูดซับที่ผิวของวัสดุดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่



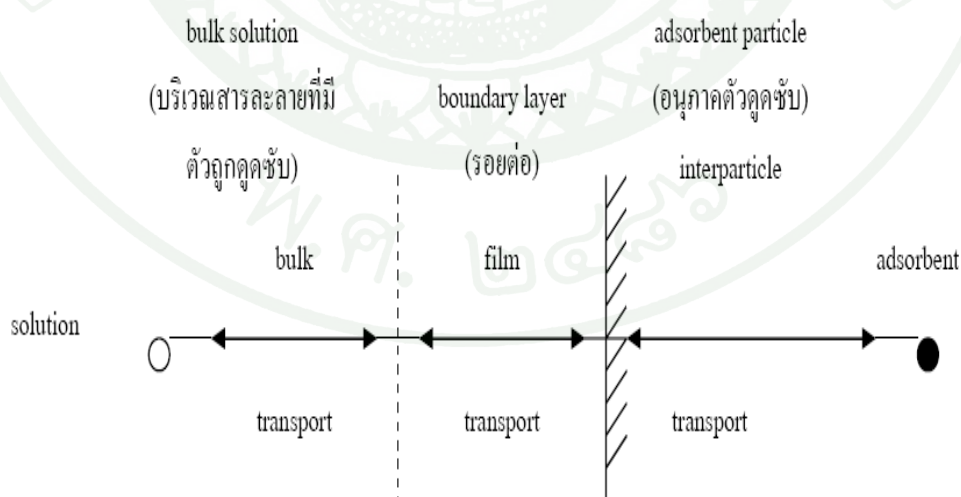
ภาพที่ 4 กลไกการดูดซับของสารดูดซับ (สาธิตา และฤทธิรัตน์ ,2546)

5.2.2 อัตราการดูดซับ (rate of molecule transfer) อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วกว่าจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกรบกวนโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในกระบวนการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนในการดูดซับ มี 3 ขั้นตอน คือ (Eckenfelder, 1981)

1) การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของวัสดุดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ

2) การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของวัสดุดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3) การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลวัสดุดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกันขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมายังวัสดุดูดซับ แสดงดังภาพที่ 5

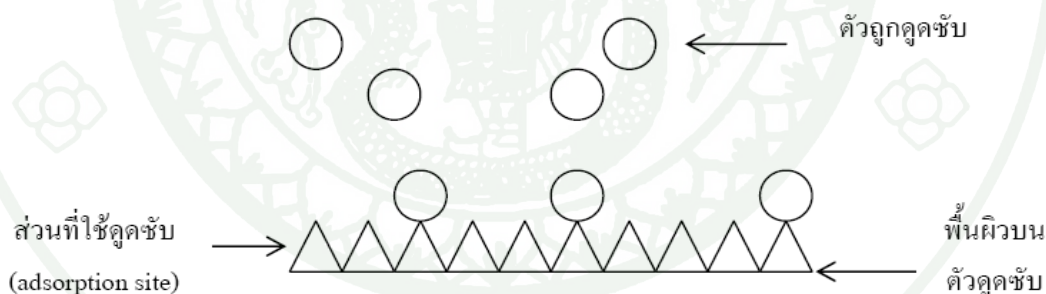


ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

5.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ละลายอยู่ในสารละลาย (C) ที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้สมการต่างๆ ได้ดังนี้

5.3.1 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ซึ่งมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แบบจำลองแสดงการดูดซับบนผิวตัวดูดซับตามสมมติฐานของ Langmuir

รูปแบบของสมการแลงเมียร์มีรูปแบบดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad (2)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{Kq_m C} \quad (3)$$

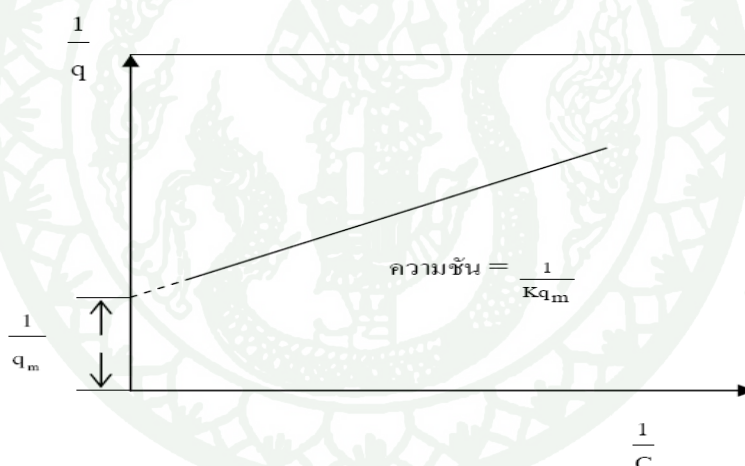
เมื่อ q คือ ปริมาณของสารดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

q_m คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

K คือ ค่าคงที่สมดุลที่สัมพันธ์กับ bonding strength (l/mg) หรือเป็นค่าคงที่ของความร้อนของการดูดซับ

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $1/q$ และ $1/C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/Kq_m$ และจุดตัดเท่ากับ $1/q_m$ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ และ $1/C$

5.3.2 สมการการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad (4)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่งเมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใช้ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

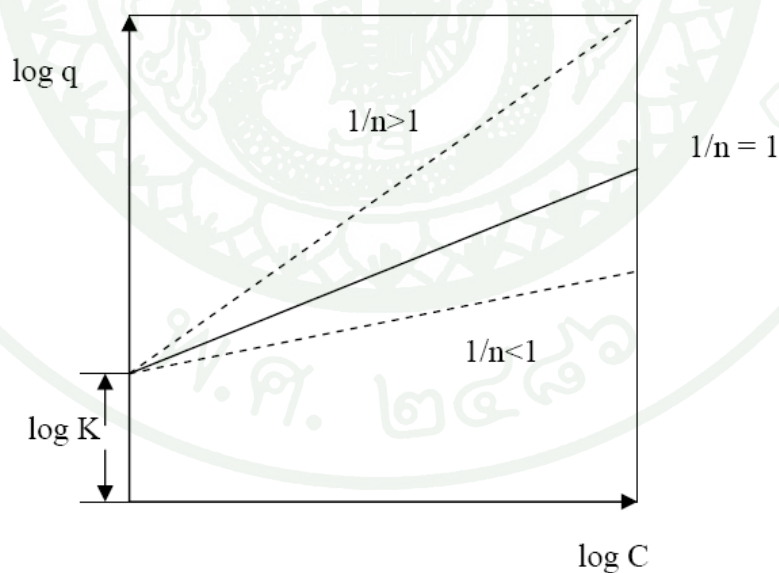
$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (5)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

$K, 1/n$ คือ ค่าคงที่ของระบบ

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$

ถ้า $1/n = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $1/n < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $1/n > 1$ บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มากหรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

5.3.3 สมการการดูดซับแบบเบท (brunauer-emmett-teller, BET adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ใช้อธิบายการดูดซับหลายชั้น (multilayer) โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของวัสดุดูดซับ
- 2) เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไปสมการการดูดซับแบบเบทแสดงในสมการที่ 6

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e)[1 + (B-1)(C_e / C_s)]} \quad (6)$$

เมื่อ X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

X_m คือปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

C_e คือความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

C_s คือความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B คือ ค่าคงที่ของพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ 6 สามารถจัดเรียงเป็นแบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \frac{B-1}{X_m B} \frac{C_e}{C_s} \quad (7)$$

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

ค่าปริมาณการดูดติดผิวสูงสุด (Capacity) ของวัสดุดูดติดผิว คือลักษณะของวัสดุดูดติดผิว ซึ่งรูปร่างของไอโซเทอร์มสามารถบอกถึงลักษณะการดูดติดผิวได้ แต่ไม่สามารถบอกค่าปริมาณการดูดติดผิวสูงสุดของวัสดุดูดติดผิวได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีแบบจำลอง หรือสามารถนำมาใช้ในการทำนายปริมาณการดูดติดผิวสูงสุดของวัสดุดูดติดผิวนี้ด้วย แบบจำลองการดูดติดผิวที่เป็นที่ยอมรับ และใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำนายลักษณะการดูดติดผิว คือ แบบจำลอง Langmuir และ Freundlich

5.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับนั้นสามารถศึกษาได้จาก Pseudo-first order และ Pseudo-second order ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สมการของ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (8)$$

อินทิเกรตสมการที่ 8 ที่สภาวะ $t=0$ ถึง >0 ($q_t=0$ ถึง >0) หลังจากนั้นจัดให้ได้สมการเส้นตรงของ Pseudo- first order ดังสมการที่ 9

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (9)$$

โดยที่ q_e หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที)

t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษา ผลของค่า pH มาพลอตกราฟ ระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t ได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo first-order (k_1) หาได้จากความชันของเส้นตรง

สมการ Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 10

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 t} \quad (10)$$

สมการที่ 10 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ 11

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (11)$$

อินทิเกรตสมการที่ 11 ที่สภาวะ $t=0$ ถึง t ($q_t=0$ ถึง q_t) จะได้ดัง สมการที่ 12

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (12)$$

จัดรูปสมการที่ 12 ให้เป็นสมการเส้นตรงในสมการที่ 13

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (13)$$

โดยที่ k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเป็น $1/q_e$ และจุดตัดแกนตั้งสามารถหาได้จากค่าคงที่ k_2

แบบจำลองทั้งสองสมการ ใช้ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับซึ่งประกอบด้วย การแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับและการแพร่ภายในรูพรุน ความถูกต้องของผลการทดลอง ตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

5.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

5.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดติดผิว (size and surface area)

ความสามารถในการดูดติดผิวของวัสดุดูดติดผิว มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดติดผิวเป็นส่วนผกผันกับขนาดของวัสดุดูดติดผิว และพื้นที่ผิวของวัสดุดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption capacity) คือวัสดุดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าวัสดุดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย เพราะพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของตัวดูดติดผิวได้มาจากโพรงภายใน ดังนั้นขนาดของวัสดุดูดติดผิวจึงมีบทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว (มันสิน, 2538)

5.5.2 ลักษณะของตัวถูกดูดติดผิว (nature of adsorbate)

สิ่งสำคัญในการดูดติดผิวของตัวถูกดูดติดผิวประการหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดติดผิวมีค่าลดลง เนื่องจากการดูดติดผิวตัวถูกดูดติดผิวจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิวยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากการเคลื่อนที่ภายในโพรง เป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิวขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิวจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว ดังนั้นการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อยหรือกับเข้าโพรงได้พอดีเพราะทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดติดผิวและวัสดุดูดติดผิวมีค่ามากที่สุด โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะเข้าไปในโพรงก่อนโมเลกุลขนาดใหญ่ (มันสิน, 2538)

5.5.3 ความปั่นป่วน (mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจรวมตัวจนเป็นฟิล์มหนา ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิวเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปยังวัสดุดูดติดผิวได้อย่างรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าโพรง ทำให้การเคลื่อนที่เข้า

โพรงจะเป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้อัตราเร็วในการดูดซับของวัสดุดูดซับจึงขึ้นอยู่กับ การแพร่เข้าสู่โพรงในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนต่ำทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้น ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาวัสดุดูดซับได้ช้า ดังนั้นการแพร่ผ่านฟิล์มจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็ว ในการดูดซับของปฏิกิริยา (มันสิน, 2538)

5.5.4 เวลาสัมผัส (contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการ บำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงสุด ทั้งนี้ก็ จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาใน ระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

5.5.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจน ไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดซับได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัว ของไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับ (มันสิน, 2538)

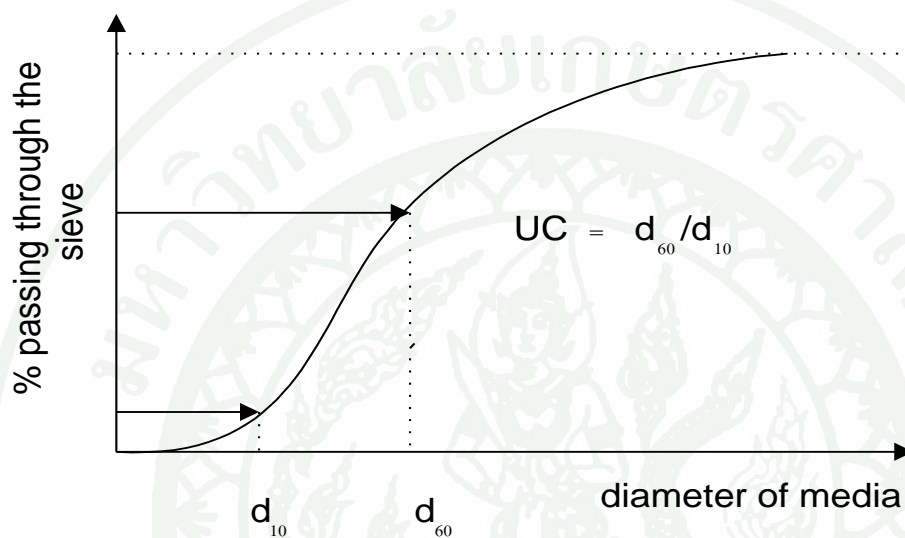
5.5.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ เมื่อ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ โดยขีดความสามารถ ในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยา แบบคายความร้อน (exothermic) (มันสิน, 2538)

5.6 การจำแนกขนาดและคุณภาพของวัสดุดูดซับ ขึ้นกับคุณสมบัติ 2 ประการ คือ

5.6.1 ขนาดประสิทธิผล (Effective size, ES) คือ ค่าขนาดช่องเปิดตะแกรงเป็น มม. ที่ วัสดุดูดซับ 10% โดยน้ำหนัก ผ่านลอดได้ เรียกว่า d_{10} วัสดุดูดซับขนาดเล็กเหล่านี้มีความสำคัญ เนื่องจากจะแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดใหญ่ จึงเป็นตัวควบคุมการไหลของน้ำ

5.6.2 สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient, U.C.) คือ ค่าที่บอกความแตกต่างของขนาดวัสดุคูดัดผิว วัสดุคูดัดผิวที่ไม่สม่ำเสมอ จะมีประสิทธิภาพการคูดัดผิวต่ำ (U.C. = d_{60} / d_{10})

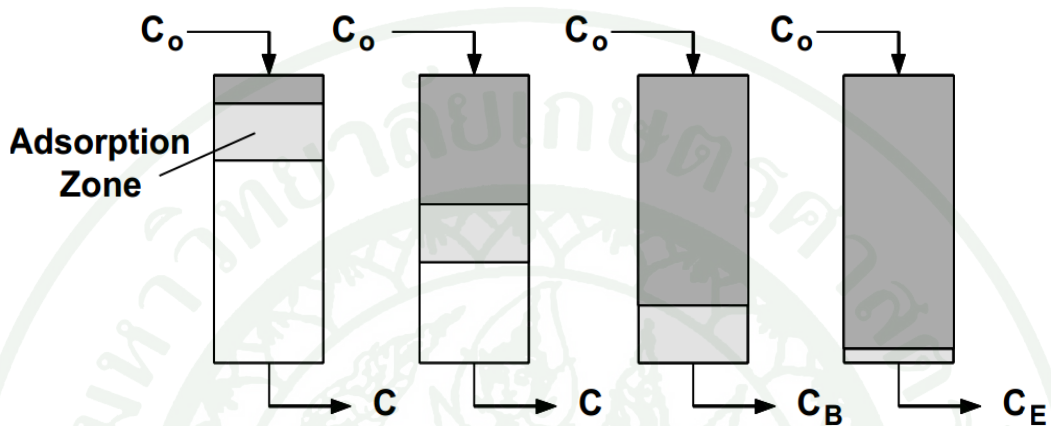


ภาพที่ 9 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ

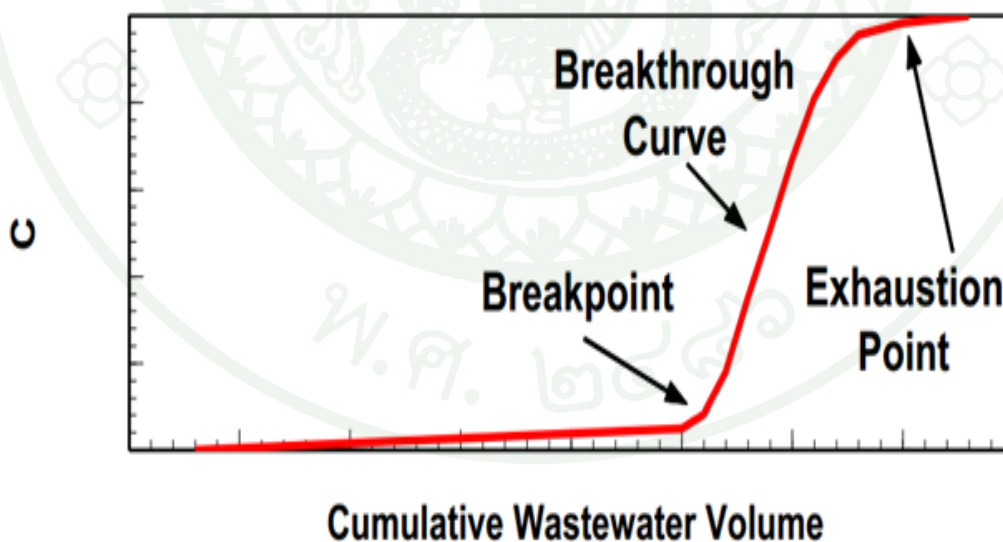
5.7 กระบวนการคูดัดผิวโดยใช้ถังกรองคูดัดผิว

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการคูดัดผิวจะสามารถพิจารณาเลือกชนิดวัสดุคูดัดผิวที่มีความเหมาะสมได้อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้ยังไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบกระบวนการคูดัดผิวจึงต้องมีการทดลองโดยใช้ถังกรองคูดัดผิว (column test) เพื่อหาอายุการใช้งานของวัสดุคูดัดผิวชนิดที่เลือกเอาไว้ว่ามีอายุการใช้งานเท่าใดจึงจะเสื่อมคุณภาพ (Sunstrom and Klei, 1995) เมื่อนำน้ำทิ้งกรองผ่านชั้นวัสดุคูดัดผิว วัสดุคูดัดผิวชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อนและชั้นของวัสดุคูดัดผิวที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาใช้งานดังแสดงในภาพที่ 10 ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำทิ้งที่ผ่านการคูดัดผิวแล้ว จะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนในที่สุดความเข้มข้นถึงค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งเรียกจุดนั้นว่าจุดเบรคทรูจ (break through point) และเส้นโค้งดังแสดงในภาพที่ 11 เรียกเส้นโค้งนี้ว่า เส้นโค้งเบรคทรูจ (break through curve) โดยเวลาที่นับจาก

เริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดเบรคทวร์จ์ เรียกว่าเวลาการใช้งาน (service time) และเมื่อวัสดุดูดซับไม่สามารถจะดูดซับได้อีก เรียกว่า จุดที่วัสดุดูดซับหมดประสิทธิภาพ (exhaust point) ซึ่งที่จุดนี้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (C_E) จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำทิ้งเข้าระบบ (C_0)



ภาพที่ 10 แสดงการเคลื่อนที่ของ adsorption zone สำหรับชั้นวัสดุดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลลงข้างล่างของน้ำ (Sunstrom and Klein ,1995)



ภาพที่ 11 แสดงลักษณะของ breakthrough curve สำหรับวัสดุดูดซับที่อยู่กับที่ตามทฤษฎี (Sunstrom and Klein ,1995)

โดยที่เวลาการใช้งาน (service time) จะมีค่าลดหรือเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1) ความสูงของชั้นวัสดุคูดัดผิว โดยเวลาการใช้งานของวัสดุคูดัดผิวจะลดลงเมื่อความสูงของวัสดุคูดัดผิวลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของชั้นกรองเพิ่มขึ้น

2) อัตราการบำบัดจะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของวัสดุคูดัดผิวคือถ้าอัตราการบำบัดสูงก็จะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ

3) ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบจะส่งผลให้เวลาการใช้งาน เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียสูงจะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าน้ำเสียที่ความเข้มข้นต่ำ

4) พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคูดัดผิว (specific surface area) วัสดุคูดัดผิวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้เวลาใช้งานมากกว่าวัสดุคูดัดผิวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านชั้นของวัสดุคูดัดผิว สามารถเลือกใช้ได้ดังนี้

1) การไหลลง (down flow) คือการให้น้ำไหลผ่านชั้นของวัสดุคูดัดผิวโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก แต่เมื่อวัสดุคูดัดผิวเสื่อมสภาพจะต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ทั้งคอลัมน์

2) การไหลขึ้น (up flow) คือการไหลที่ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นวัสดุคูดัดผิวขึ้นข้างบน สามารถฟื้นฟูสภาพของชั้นวัสดุคูดัดผิวที่หมดสภาพแล้วได้เป็นระยะ ๆ โดยการเอาวัสดุคูดัดผิวออกด้านล่างคอลัมน์ เมื่อนำไปทำการฟื้นฟูสภาพแล้วสามารถนำกลับมาใส่ในส่วนบนของคอลัมน์ได้

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

AN *et al.*(2001) ได้ศึกษาการนำเปลือกปูมาทำการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และโครเมียม เปรียบเทียบกับการกำจัดโดยการใช้ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ และ เรซิน แล้วพบว่า เปลือกปูมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้มากกว่าเรซิน ซีโอไลต์ และถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ต่อมาได้มีการนำเปลือกปูมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม

และโครเมียม พบว่าเปลือกปูมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม (Dong,2003) จากนั้นได้มีการนำเปลือกหอยมาทำการกำจัดทองแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างเปลือกหอยปกติกับเปลือกหอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านกรดอ่อนๆ แล้วพบว่า เปลือกหอยที่ผ่านกรดอ่อนๆ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงจากเดิม 38.93 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 138.95 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อตรวจดูลักษณะพื้นที่ผิวหลังการปรับปรุงสภาพแล้วพบว่าหลังการผ่านกรดอ่อน พื้นที่ผิวที่เรียกว่าเปลือกหอยที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง และเมื่อใช้เปลือกหอยขนาด 4.0 - 4.75 มิลลิเมตร ผสมกับมอสในการกำจัดแคดเมียมและนิกเกิล โดยใช้คอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตร/นาที ความสูงของคอลัมน์ 15 เซนติเมตร พบว่า สามารถใช้งานได้ดีและสามารถพัฒนาไปใช้ในระบบการบำบัดที่มีการปนเปื้อน โลหะหนักสูง เช่น ในการบำบัดน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบ เป็นต้น (Li and Champagne,2009) ต่อมาได้มีการศึกษาลงไปในแต่ละชนิดของเปลือกหอย เช่น ในหอยนางรม หอยหลอด หอยเชลล์ หอยแมลงภู่และหอยแครง ซึ่งพบว่าเมื่อนำเปลือกหอยหลอดและหอยนางรมมาทำการกำจัดตะกั่ว แคดเมียมและสังกะสี พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงทั้งหมด โดยที่เปลือกหอยนางรมจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากกว่าเปลือกหอยหลอด แต่เปลือกหอยหลอดมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีได้ดีกว่าเปลือกหอยนางรม และประสิทธิภาพที่หายไปนั้นอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่อยู่บนเปลือกหอยและขนาดของเปลือกหอย (Yang *et al.*,2011) และนำเปลือกหอยเชลล์มาทำการศึกษาในระดับนาโนเพื่อใช้ในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง (Yang *et al.*,2012) ในเปลือกหอยแครงได้มีการนำมาศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีมากกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ (จรรยาพร,2545)

จะเห็นได้ว่าเปลือกหอยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ดี และแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของเปลือกหอย ดังนั้นกระช้ำซึ่งเป็นเปลือกหอยหลายๆ ชนิดที่ได้รับการปรับปรุง และทำความสะอาดจากธรรมชาติจึงมีความสะอาดในระดับหนึ่ง ก็น่าที่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ดี ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้อาจตอบได้ว่ากระช้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเป็นอย่างไร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น Perkin-Elmer Analyst 800
3. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-6310F
4. เครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) รุ่น Miniflex Rigaku
5. เครื่องเขย่า (shaker)
6. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter)
7. ตะแกรงร่อน (Laboratory Test Sieve)
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
9. ขวดกำหนดปริมาตร
10. ปิเปตและลูกยาง
11. หลอดหยด
12. ขวดพลาสติก
13. ท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 1 เมตร

สารเคมี

1. สารละลายสังกะสี ทองแดง มาตรฐานสำหรับเครื่อง AAS ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ยี่ห้อ CARLO ERBA
2. สารละลายแคดเมียมมาตรฐานสำหรับเครื่อง AAS ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ยี่ห้อ fisher Scientific
3. กรดไนตริก (HNO_3) ยี่ห้อ QRec
4. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ยี่ห้อ UNIVAR
5. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

วิธีการ

1. การเก็บตัวอย่างกระช้ำในพื้นที่ศึกษา

ทำการเก็บแบบสุ่มจำนวน 10 จุด จุดละ 1 กิโลกรัม จากนั้นนำมาผสมรวมกันเพื่อทำการศึกษารูปประกอบ และใช้สำหรับการศึกษาทดลองต่อไป

2. การศึกษาองค์ประกอบของกระช้ำ

ทำการศึกษารูปประกอบของกระช้ำที่ได้มาจากพื้นที่ศึกษาเพื่อหาประเภทของเปลือกหอยและปริมาณโดยใช้วิธี Quartering method และทำการศึกษารูปประกอบทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่น รูพรุน โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ เครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

3. การเตรียมตัวดูดซับจากกระช้ำ

ทำความสะอาดกระช้ำด้วยน้ำกลั่น และนำมาตากแดดจนแห้งสนิทประมาณ 3-5 วัน นำตัวอย่างกระช้ำที่ได้มาบด และร่อนผ่านตะแกรงเพื่อทำการหาขนาดประสิทธิผล (Effective Size: E.S.) และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity coefficient: U.C.) โดยใช้วิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM)

4. การศึกษาความสามารถในการดูดซับของกระช้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

การศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับของทองแดง สังกะสี และ แคดเมียมได้โดยใช้วิธีการดูดซับแบบแบตช์ ตามวิธีการศึกษาของตยาดี (2547) ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่

- 4.1 ค่าพีเอชเริ่มต้น (3,5)
- 4.2 ระยะเวลาบ่มกวน (30,60,90,120 นาที)
- 4.3 ระยะเวลาสัมผัส (30,60,90,120 นาที)
- 4.4 ชนิดของเปลือกหอยในกระช้ำ (หอยลาย,หอยตลับ,หอยแครง)
- 4.5 ขนาดของกระช้ำ (>4.725 , 2-4.725 , 0.425-2 มม.)

4.6 ปริมาณของตัวดูดซับ (0.25 ,0.50 ,0.75,1.00 กรัม)

4.7 อุณหภูมิ (26±0.5, 30±0.5 องศาเซลเซียส)

4.8 ความเข้มข้นของสารละลาย (25,50,75,100 มก./ล.)

5. การหาไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์ดูดซับของกระช้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

5.1 การหาไอโซเทอร์มการดูดซับ

5.1.1 นำผลทดลองที่ได้จากการหาความสามารถในการดูดซับมาทำการหาไอโซเทอร์มจากสมการฟรุนดลิช และสมการแลงเมียร์

5.1.2 พิจารณาความถูกต้องของไอโซเทอร์มแต่ละแบบจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

5.2 การหาจลนศาสตร์การดูดซับ

5.2.1 นำผลทดลองที่ได้จากการหาความสามารถในการดูดซับมาทำการหาจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order เพื่อหาค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยา

5.2.2 พิจารณาความถูกต้องของจลนศาสตร์การดูดซับแต่ละแบบจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

6. การศึกษาการนำกระช้ำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำจากโรงงานชุบโลหะ

1) เก็บตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานชุบโลหะ

2) วิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ pH ความขุ่น ค่าการนำไฟฟ้า และ ปริมาณโลหะหนัก (ทองแดง,สังกะสี,แคดเมียม)

3) นำน้ำเสียสังเคราะห์มาผ่านคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ภายในบรรจุกระช้ำสูง 50 เซนติเมตร ด้วยอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที

4) นำน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักผ่านคอลัมน์ และนำน้ำที่ผ่านคอลัมน์มาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักอีกครั้งทุกๆ 1 ชม. จนครบ 24 ชั่วโมง

- 5) ทำซ้ำ 3 ครั้ง
- 6) จากนั้นเปลี่ยนตัวอย่างน้ำเป็นน้ำที่ได้มาจากโรงงานชุบโลหะและทำตามขั้นตอนที่ 1-5 อีกครั้ง
- 7) หาประสิทธิภาพและอายุการใช้งานในการกำจัดโลหะหนักของกระช้ำเมื่อใช้กับน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานชุบโลหะ เปรียบเทียบกับน้ำเสียดังเคราะห์

7. วิธีการวิเคราะห์

ในการทดลองทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำ ได้แก่ ค่าพีเอช และ ปริมาณโลหะหนัก (ทองแดง, สังกะสี, แคดเมียม) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
พีเอช	pH Meter
ความขุ่น	spectrometer
ค่าการนำไฟฟ้า	TDS & conduct meter
ทองแดง	Atomic Absorption spectrometric Method
สังกะสี	Atomic Absorption spectrometric Method
แคดเมียม	Atomic Absorption spectrometric Method

8. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ และ ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

9. แผนดำเนินการ

เริ่มดำเนินการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ณ เดือนมกราคม พ.ศ. 2555 และทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2555

ผลและวิจารณ์

1. ศึกษาองค์ประกอบของกระเช้า

1.1 องค์ประกอบทางชนิดและปริมาณ

ผลการศึกษาค้นคว้าองค์ประกอบของกระเช้าที่นำมาจากบริเวณป่าชายเลนในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้และปฏิบัติการอนุรักษ์ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมหาชัยฝั่งตะวันออก ตำบลโคกขาม อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร เมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2555 โดยทำการเก็บแบบสุ่มจำนวน 10 จุด จุดละ 1 กิโลกรัม จากนั้นนำมาผสมรวมกันเพื่อทำการศึกษาองค์ประกอบ

กระเช้าเป็นชื่อเรียกของเปลือกหอยผสมที่ถูกพัดพามาโดยคลื่นในทะเลมากองรวมกันบริเวณแนวชายฝั่ง หรือในป่าชายเลนจากการศึกษาพบว่าประเภทของเปลือกหอยในกระเช้ามีทั้งหอยฝาเดียวและหอยสองฝา (ภาพที่ 12) โดยเปลือกหอยที่พบปริมาณมากที่สุดจะเป็นกลุ่มหอยสองฝา ได้แก่ เปลือกหอยลาย มากที่สุด รองลงมาเป็นเปลือกหอยตลับและหอยแครงตามลำดับ หอยฝาเดียว ได้แก่ หอยตะกาย เป็นต้น และยังเปลือกของเพรียงหินอีกด้วย โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่ไม่สมบูรณ์ มีการแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ หรือเป็นเปลือกหอยที่มีขนาดเล็ก สภาพเปลือกมีสีที่อ่อนกว่าสีเดิม และมีความมันวาวลดลง ซึ่งเมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบ ได้ข้อมูลชนิดและปริมาณของเปลือกหอยที่พบในกระเช้าดังที่แสดงในตารางที่ 2

การที่กระเช้ามีองค์ประกอบของหอยสองฝามากกว่าหอยฝาเดียวนั้น อาจเกิดจากในบริเวณนั้นเป็นที่อยู่อาศัยของหอยสองฝามากกว่าหอยฝาเดียว หรือหอยสองฝามีความสามารถในการทนต่อแรงคลื่นได้น้อยกว่าหอยฝาเดียว ทำให้หอยสองฝาเกิดการตายมากกว่าหอยฝาเดียวและถึงพัดพามากองรวมกันได้มากกว่า ทั้งนี้กระเช้าในบริเวณที่แตกต่างกันอาจจะมีส่วนประกอบของเปลือกหอยที่แตกต่างกันไปด้วย ส่วนสภาพที่ไม่สมบูรณ์ของเปลือกหอยนั้นอาจเกิดจากแรงคลื่นที่มากกระทบ และน้ำทะเลที่มีส่วนจัดผิวเปลือกหอยให้มีสีที่อ่อนลงและความมันวาวลดลง

ตารางที่ 2 ชนิดและปริมาณของเปลือกหอยที่พบในกระช้ำ

ชนิดของเปลือกหอย	ปริมาณ(ร้อยละ)
หอยสองฝา	
หอยลาย (Carpet shell)	31.76
หอยตลับ(Venus shell)	23.65
หอยแครง (Cockle shell)	18.81
หอยแมลงภู่(Mussel shell)	5.97
หอยกะพง(Acuate mussel shell)	2.33
หอยฝาเดียว	
หอยตะกาย(Moon shell)	9.53
เพรียงหิน(Rock Barnacle)	7.95



ภาพที่ 12 เปลือกหอยชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในกระช้ำ

1.2 องค์ประกอบทางกายภาพของกระช้ำ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของกระช้ำ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่นและขนาดรูพรุน พบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ 0.6214 ตารางเมตรต่อกรัม ความหนาแน่น 1.5621 กรัมต่อมิลลิเมตร และขนาดรูพรุน 6000- 8000 อังสตรอม เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางกายภาพของเปลือกหอยสามชนิดหลักที่ปรากฏในกระช้ำ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าน้อยกว่าหอยแครงและหอยตลับ แต่มีค่าสูงกว่าหอยลาย แต่ความหนาแน่นและขนาดรูพรุนมีค่าน้อยกว่าหอยลายแต่มากกว่าหอยแครงและหอยตลับ และเมื่อดูถึงลักษณะพื้นที่ผิวของกระช้ำ (ภาพที่ 13) พบว่ามีพื้นที่ผิวที่เรียบกว่า เปลือกหอยลาย หอยแครง และหอยตลับ

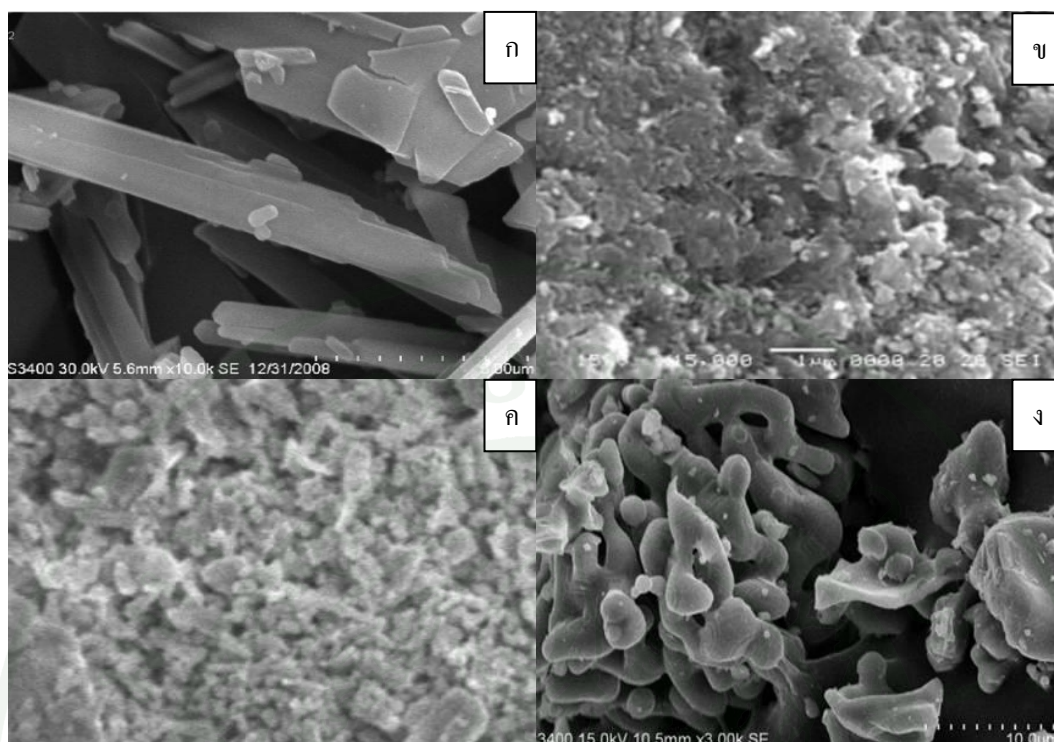
1.3 องค์ประกอบทางเคมีของกระช้ำ

เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกระช้ำ ด้วยเทคนิค X - Ray Diffraction พบว่า ประกอบด้วยแร่แคลไซต์(Calcite) หรือ มีแคลเซียมคาร์บอเนต ถึง 97.31% ร่วมกับแร่อื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งแคลไซต์เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดซับผิวชนิดหนึ่ง ดังนั้น กระช้ำจึงสามารถนำมาทำเป็นตัวดูดซับได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยลาย หอยแครง และ หอยตลับ (ตารางที่ 4) พบว่า มีปริมาณแคลไซต์ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางกายภาพของกระช้ำเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยลาย หอยแครง และ หอยตลับ

องค์ประกอบทางกายภาพ	กระช้ำ	หอยลาย ^a	หอยแครง ^b	หอยตลับ ^c
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)	0.6214	0.4481	11.15	0.9
ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	1.5621	2.7744	0.995	1.3425
ขนาดรูพรุน(อังสตรอม)	6000-8000	8000	6000-15000	5000

หมายเหตุ ^a(ตยาภิ,2547) ,^b(พรพิมล,2547) และ ^c(Viriya-empikul *et al.*,2012)



ภาพที่ 13 รูปทรงของกระช้ำเปรียบเทียบกับเปลือก หอยลาย หอยแครงและหอยตลับ

- (ก) กระช้ำกำลังขยาย 30000 เท่า
- (ข) เปลือกหอยลายกำลังขยาย 15000 เท่า (ตยาจี,2547)
- (ค) เปลือกหอยแครงกำลังขยาย 2000 เท่า (พรพิมล,2547)
- (ง) เปลือกหอยตลับที่กำลังขยาย 30000 เท่า (Viriya-empikul *et al.*,2012)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของกระช้ำเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยลาย หอยแครง และหอยตลับ

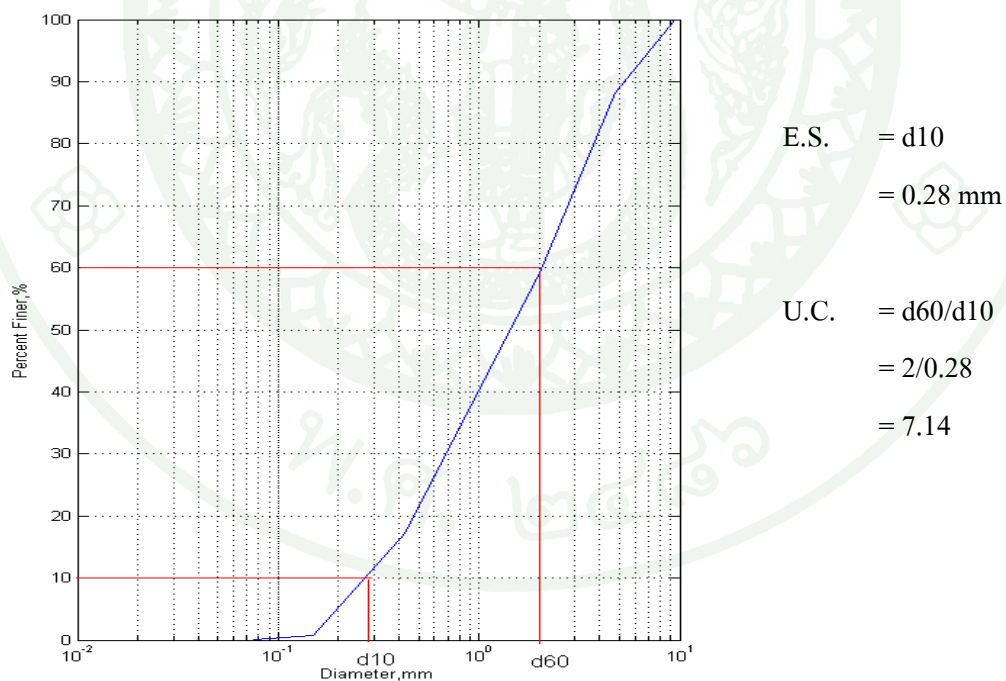
องค์ประกอบทางเคมี	กระช้ำ	หอยลาย ^ก	หอยแครง ^ข	หอยตลับ ^ค
แคลเซียม(Ca)	97.31	97	98.56	98
อะลูมิเนียม(Al)	-	2.38	-	-
ไททานเนียม(Ti)	-	0.62	-	-

หมายเหตุ ^ก(ตยาจี,2547) ,^ข(พรพิมล,2547) และ ^ค(Viriya-empikul *et al.*,2012)

2. ศึกษาขนาดประสิทธิผล (Effective Size: E.S.) และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity coefficient: U.C.) ของกระช้ำ

ผลการศึกษขนาดประสิทธิผล (Effective Size: E.S.) และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity coefficient: U.C.) ของกระช้ำ โดยร่อนผ่านตะแกรงตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM)

จากผลการศึกษาพบว่า กระช้ำมีขนาดประสิทธิผล (Effective Size: E.S.) มีความสำคัญเนื่องจากจะแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดใหญ่ จึงเป็นตัวควบคุมการไหลของน้ำ ซึ่งในกรณีทดลองมีค่าอยู่ 0.28 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่อาจจะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของน้ำให้ช้าลงได้ และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity coefficient: U.C.) คือ ค่าที่บอกความแตกต่างของขนาดวัสดุคูดัดผิว ซึ่งในกระช้ำมีค่า อยู่ที่ 7.14 ซึ่งถือได้ว่ามีความสม่ำเสมออยู่ในเกณฑ์ที่ดีดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การกระจายตัวของขนาดเปลือกหอยในกระช้ำ

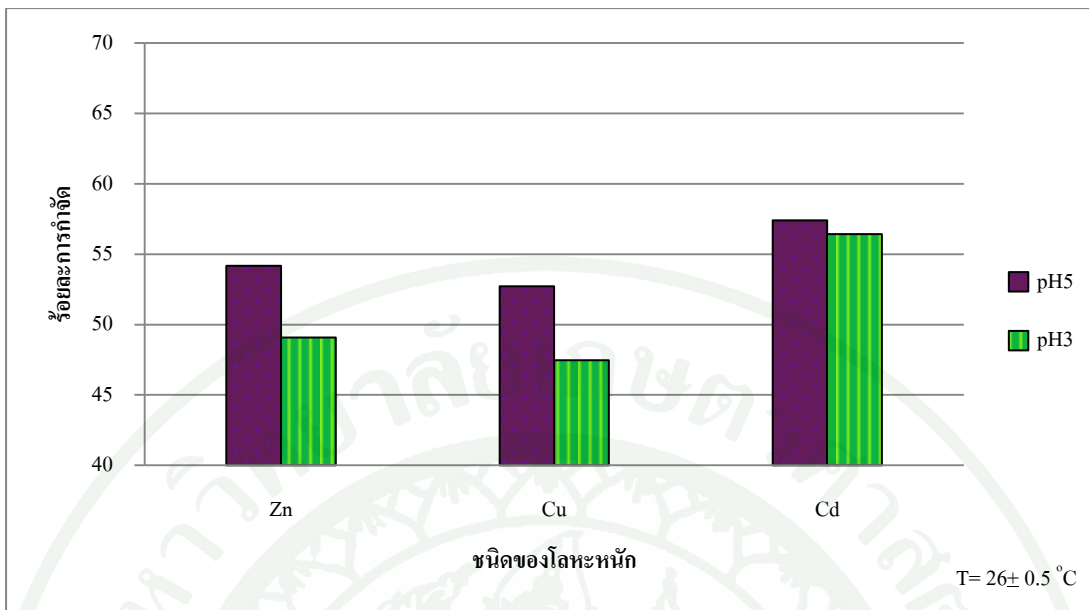
3. ศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อการดูดซับของกระช้ำ

ผลการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อการดูดซับของกระช้ำ ใช้วิธีการดูดซับแบบแบดจ์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าพีเอช ระยะเวลาปั่นกววน (equilibrium time หรือ shaking time) ระยะเวลาสัมผัส (contact time) ปริมาณของตัวดูดซับ(กระช้ำ) ขนาดของตัวดูดซับ(กระช้ำ) และชนิดของเปลือกหอยที่มีอยู่ในกระช้ำ ซึ่งโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ได้ผลการศึกษาดังนี้

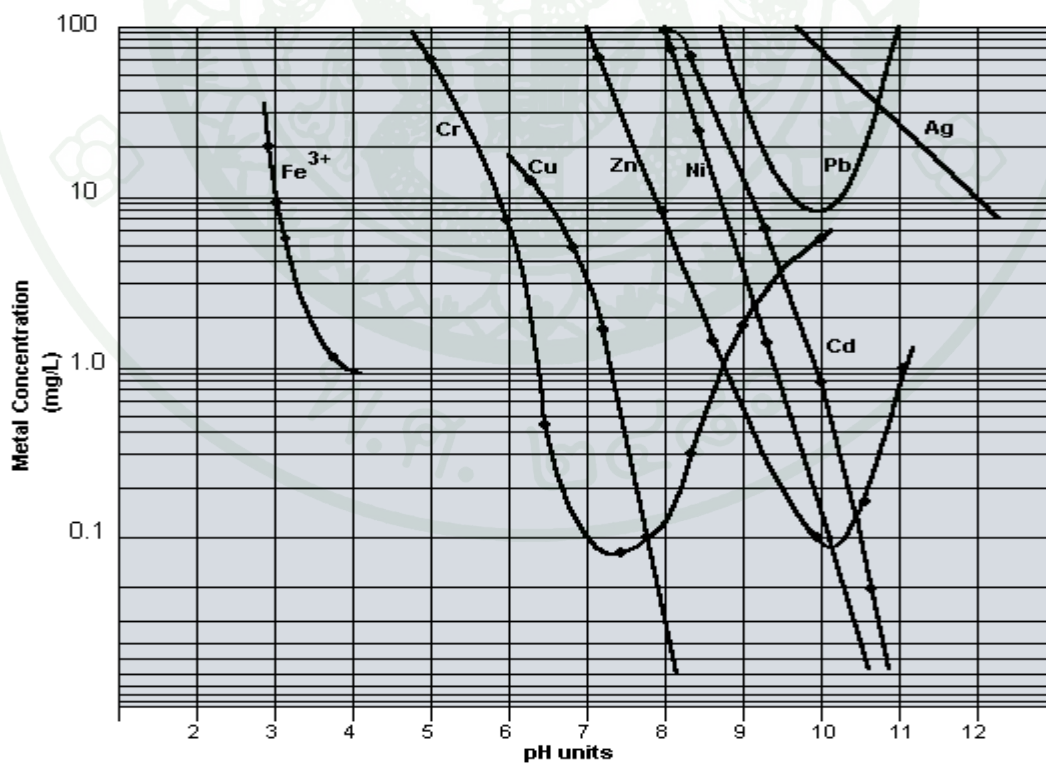
3.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี ไอออน ทองแดง ไอออน และแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร และทดลองแปรผันค่าพีเอชโดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 2 ค่า ได้แก่ 3 และ 5 ใช้ปริมาณกระช้ำ 0.25 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามของกระช้ำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งพีเอชเท่ากับ 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามจะเกิดขึ้นสูงที่สุด เพราะตั้งแต่พีเอช 6 ขึ้นไปจะเริ่มเกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของสังกะสี แคดเมียมและทองแดง (ดังภาพที่ 16) ทั้งนี้เนื่องจาก พีเอชที่ต่ำหรือเป็นกรด จะมีการจับกันระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับ active site ที่เป็นประจุลบบริเวณผิวเซลล์ จึงทำให้เกิดแรงผลักเพิ่มขึ้น จึงทำให้โลหะหนักถูกดูดซับได้น้อยและเมื่อพีเอชสูงขึ้นจนเป็นด่าง เกิดจากการตกตะกอนในรูปโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ดังนั้นช่วงพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 โดยเมื่อเข้าสู่สมดุลแล้ว จะมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 5.61 ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระช้ำ



ภาพที่ 15 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



ภาพที่ 16 การตกตะกอนของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ

3.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียดังเคราะห์สังกะสีไอออน ทองแดงไอออน และแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 และทดลองแปรผันค่าระยะเวลาปั่นกวนทั้งหมด 4 เวลา ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ใช้ปริมาณกระช้ำ 0.25 กรัม โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

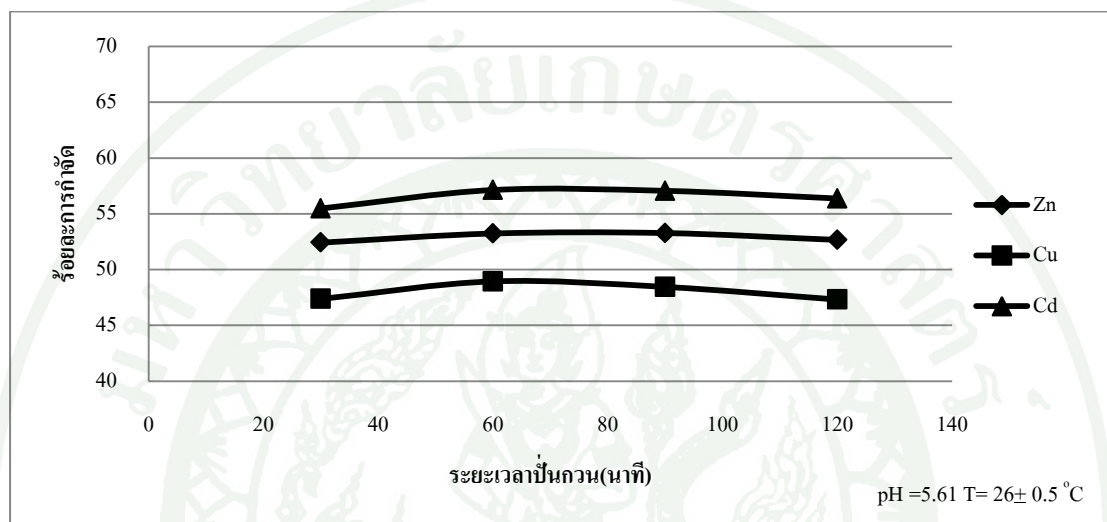
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 17 พบว่า เมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียดังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามของกระช้ำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเวลาปั่นกวนที่ 60 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามจะเกิดขึ้นสูงที่สุด เนื่องจาก ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาการปั่นกวนมากขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการทดลองพบว่าระยะเวลาประมาณ 60 นาที เป็นระยะเข้าสู่สมดุล ดังนั้นระยะเวลาการปั่นกวนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือ 60 นาที

3.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับโลหะหนักต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

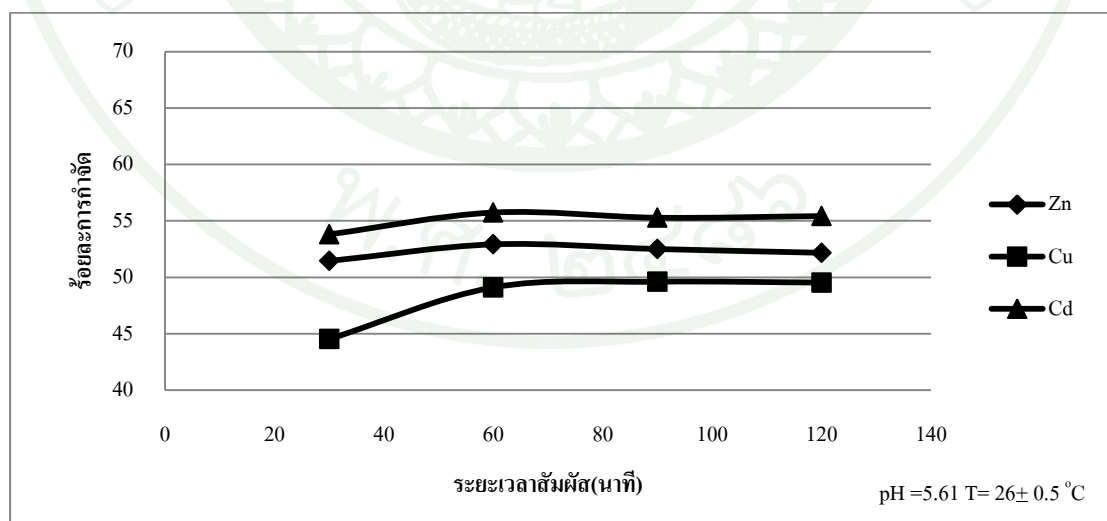
การทดลองนี้ใช้น้ำเสียดังเคราะห์สังกะสีไอออน ทองแดงไอออน และแคดเมียมไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกวน 60 นาที และทดลองแปรผันค่าระยะเวลาสัมผัส ทั้งหมด 4 เวลา ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 นาที ใช้ปริมาณกระช้ำ 0.25 กรัม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียดังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามของกระช้ำเพิ่มขึ้น

จนกระทั่งระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามจะเกิดขึ้นสูงที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาการสัมผัสมากขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือ 60 นาที



ภาพที่ 17 ผลของระยะเวลาป็นกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



ภาพที่ 18 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

3.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ(กระช้ำ)ต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

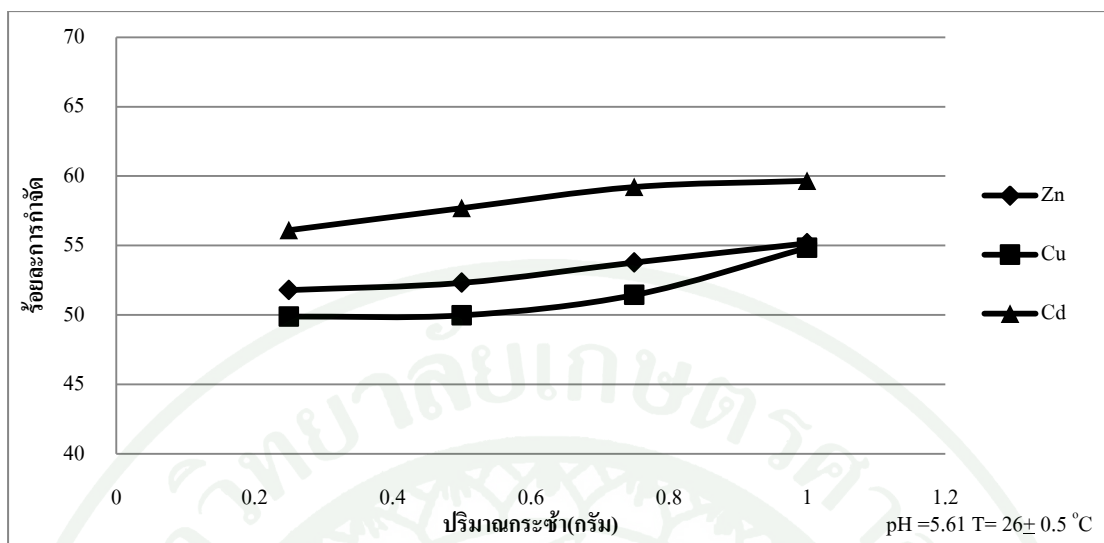
การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่สังกะสีไอออน ทองแดงไอออน และแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ใช้และทดลองแปรผันปริมาณกระช้ำทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 กรัม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 19 พบว่า เมื่อปริมาณกระช้ำเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นจะประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อมีขนาดเท่ากัน ปริมาณกระช้ำที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณกระช้ำมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักทั้งสามคือ 0.25 กรัม

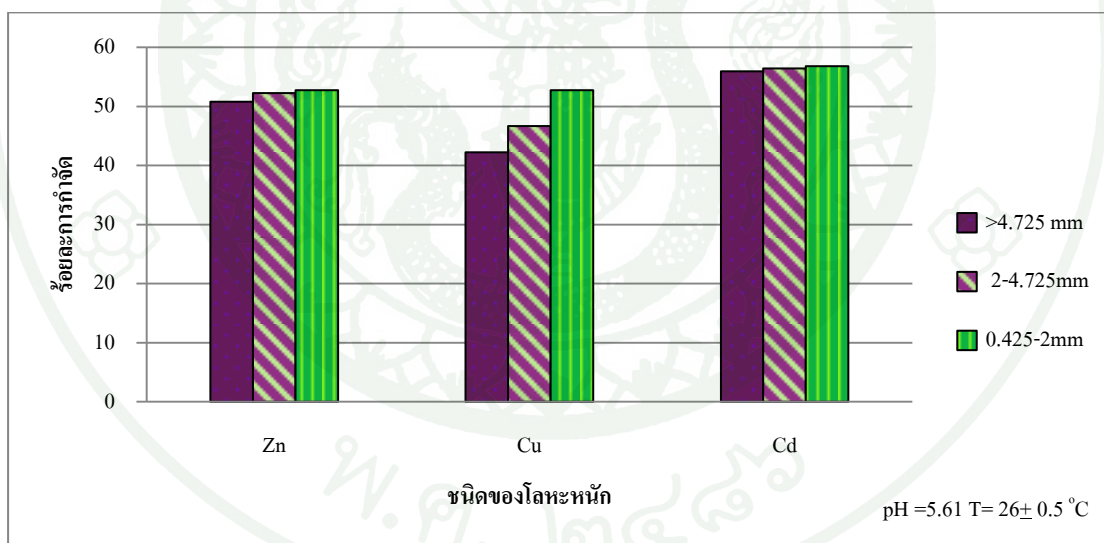
3.5 ศึกษาอิทธิพลของขนาดเปลือกหอยในกระช้ำต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่สังกะสีไอออน ทองแดงไอออน และแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ทดลองแปรผันขนาดของเปลือกหอยในกระช้ำทั้งหมด 3 ขนาดคือ 1) มากกว่า 4.275 มิลลิเมตร, (เปลือกหอยที่อยู่บนตะแกรงเบอร์ 4) 2) มีขนาดอยู่ระหว่าง 2-4.275 มิลลิเมตร(เปลือกหอยที่อยู่บนตะแกรงเบอร์ 10) และ3) มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.4275-2 มิลลิเมตร (เปลือกหอยที่อยู่บนตะแกรงเบอร์ 40) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 20 พบว่า ในปริมาณเท่าๆกัน ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ผลจากการทดลองพบว่า ที่ขนาด 0.425 – 2.0 มิลลิเมตรมากกว่าขนาด 2.0 - 4.275 มิลลิเมตรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เนื่องจากในกระช้ำมีปริมาณตัวดูดซับขนาด 2.0 - 4.275 มิลลิเมตร มากกว่า ขนาด 0.425 – 2.0 มิลลิเมตร กว่า 2-3 เท่า จึงควรใช้ขนาด 2.0 - 4.275 มิลลิเมตร



ภาพที่ 19 ผลของปริมาณตัวดูดซับ(กระช้ำ)ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และ แคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

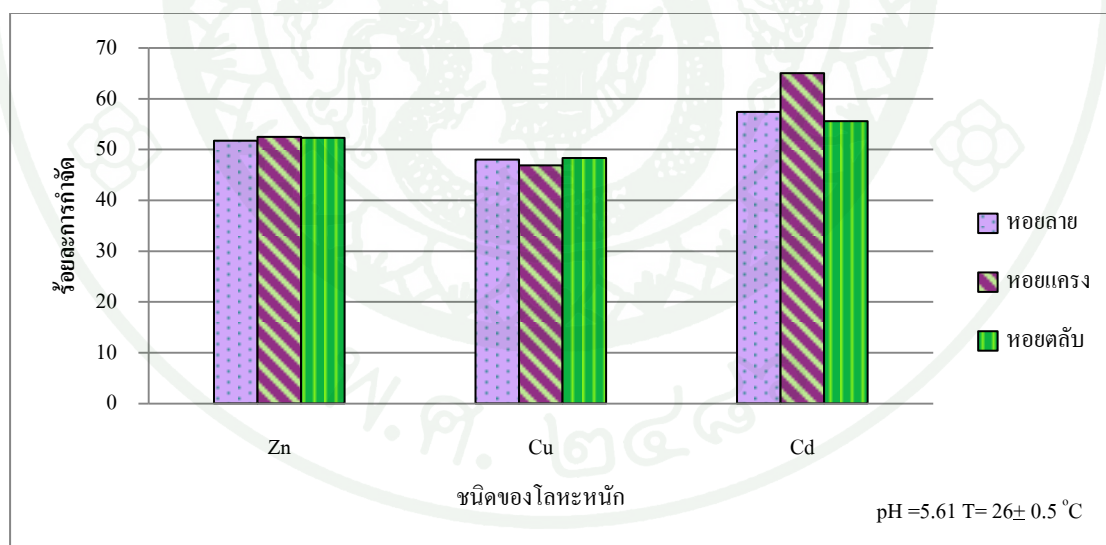


ภาพที่ 20 ผลของขนาดตัวดูดซับ(กระช้ำ)ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และ แคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

3.6 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของเปลือกหอยในกระช้ำต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่สังกะสี ไอออน ทองแดง ไอออน และแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ทดลองแปรผันชนิดของเปลือกหอยในกระช้ำทั้งหมด 3 ชนิด เนื่องจากเป็นชนิดที่พบว่าเป็นองค์ประกอบหลักของกระช้ำในการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ หอยลาย หอยแครง และหอยตลับทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 21 พบว่า เมื่อชนิดของเปลือกหอยในกระช้ำส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ดังนี้คือ หอยลายจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมากที่สุด หอยแครงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากที่สุด และหอยตลับจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากที่สุด ดังนั้นหากต้องการกำจัดโลหะหนักทั้งสามพร้อมกัน ควรที่จะใช้เปลือกหอยผสมของทั้งสามชนิด หรือใช้กระช้ำที่มีหอยทั้งสามเป็นองค์ประกอบหลัก



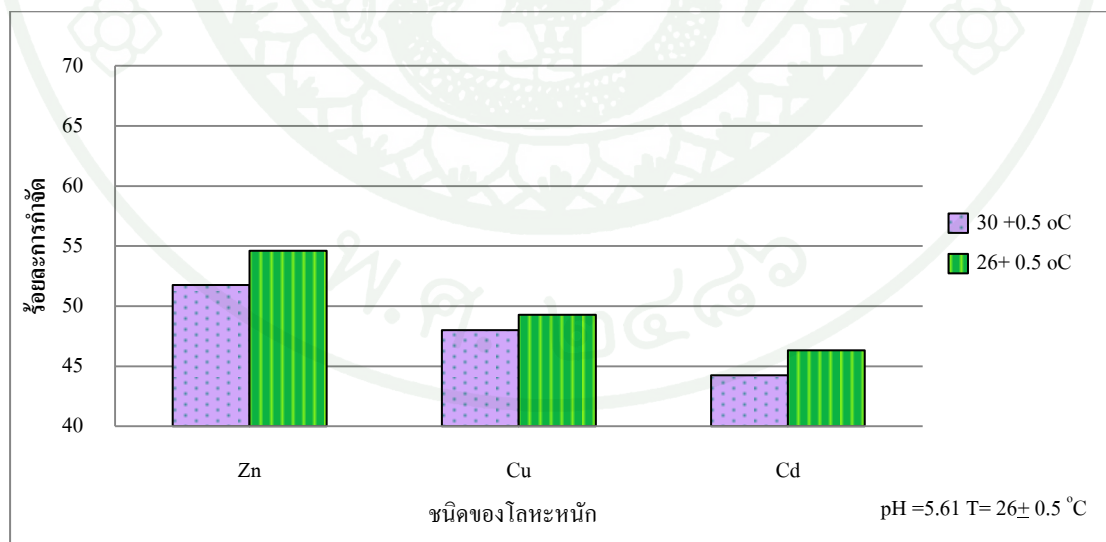
ภาพที่ 21 ผลของชนิดของเปลือกหอยในกระช้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

3.7 ศักยภาพของอุณหภูมิต่อการดูดซับโลหะหนักของกระช้ำ

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่สังกะสีไอออน ทองแดงไอออน และแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ทดลองแปรผันอุณหภูมิโดยใช้ที่ 26 ± 0.5 และ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส และ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 22 พบว่า อุณหภูมิส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจาก การดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic) (มันสิน,2538)

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม โดยการกระช้ำคือที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และพีเอชที่สมดุลเท่ากับ 5.61 ระยะเวลาปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ปริมาณของตัวดูดซับ (กระช้ำ) 0.25 กรัม ขนาดของตัวดูดซับ (กระช้ำ) อยู่ระหว่าง 2-4.275 มิลลิเมตร และเป็นกระช้ำที่มีองค์ประกอบของเปลือกหอยทั้งสามชนิดอยู่ คือ หอยแครง หอยตลับ และหอยลาย ที่อุณหภูมิ 26 ± 0.5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 22 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

4. ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์ดูดซับของกระช้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีไอออน ทองแดงไอออน และแคดเมียมไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ขนาดของกระช้ำอยู่ระหว่าง 2-4.275 มิลลิเมตร และเป็นกระช้ำที่มีส่วนประกอบของหอยแครง หอยลาย และหอยดัลบนน้ำหนัก 0.25 กรัม ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในเวลา 15 30 45 60 75 90 120 และ 180 นาที ครั้งละ 1 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ให้เป็น 10 มิลลิตร กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ทำการทดลอง 3 ครั้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ และนำข้อมูลที่ได้มาหาไอโซเทอร์ม และจลนศาสตร์การดูดซับต่อไป และทำการทดลองเช่นเดียวกัน โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของกระช้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

เมื่อนำข้อมูลมาพลอตกราฟไอโซเทอร์มดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พิจารณาความสอดคล้องของไอโซเทอร์มแต่ละแบบจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และทำการทดลองเช่นเดียวกัน โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักทั้งสามสูงขึ้น ร้อยละการกำจัดจะลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเพิ่มมากขึ้นจะไปส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำเสียสังเคราะห์ทำให้สารละลายเข้าทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับได้ยาก เพราะเมื่อมวลโมเลกุลของน้ำเสียมีขนาดใหญ่จะเกิดการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับน้อยลง ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดต่ำ ซึ่งถ่านกัมมันต์ก็ให้ผลการทดลองในทิศทางเดียวกัน (ภาพที่ 24)

เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาพลอตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของกระช้ำในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในภาพที่ 25 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมของกระช้ำ มีค่าเท่ากับ 0.9977 , 0.9881 และ 0.9897 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.97-1.02) และเมื่อพิจารณาจากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในภาพที่ 26 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมของกระช้ำ

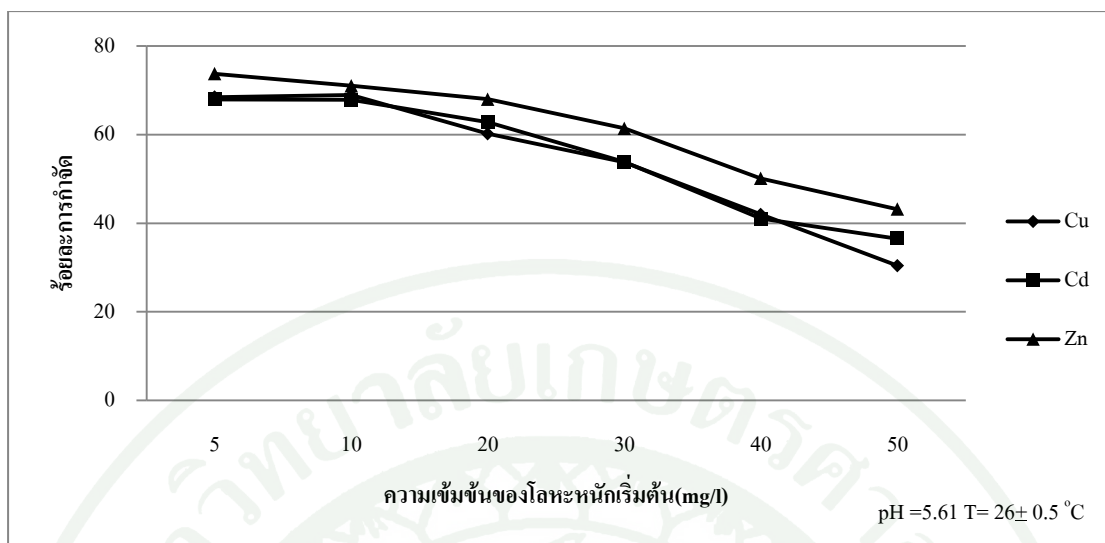
มีค่าเท่ากับ 0.9417 , 0.9166 และ 0.9147 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.97 ดังนั้นการดูดซับของกระช้ำจึงไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดิช ดังนั้นการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ของกระช้ำจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมของ ฟรุนดิช

เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาพลอตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในภาพที่ 27 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมของถ่านกัมมันต์ มีค่าเท่ากับ 0.9959 , 0.9898 และ 0.9988 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้(0.97-1.02) และเมื่อพิจารณาจากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชในภาพที่ 28 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมของถ่านกัมมันต์ มีค่าเท่ากับ 0.9184 0.8945 และ 0.9490 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.97 ดังนั้นการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงไม่สอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มฟรุนดิช ดังนั้นการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ของถ่านกัมมันต์จึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมของฟรุนดิช เช่นเดียวกับกระช้ำ

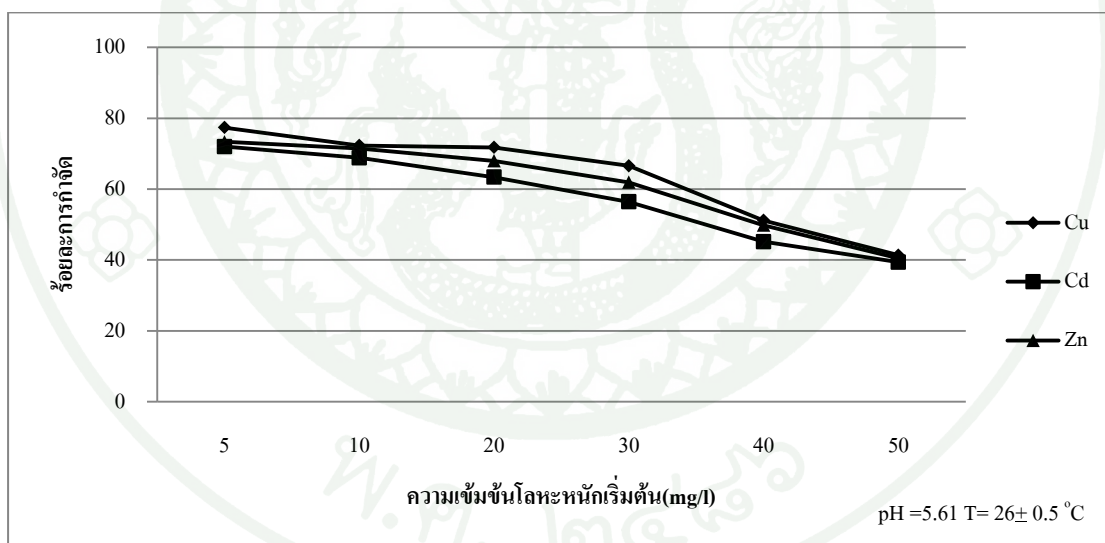
ดังนั้นไอโซเทอร์มในการดูดซับของกระช้ำและถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดิช ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วพบว่าแบบแลงเมียร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ซึ่งในกระช้ำมีค่าในการดูดซับสังกะสี ทองแดง แคดเมียม เท่ากับ 3.232 2.683 และ 2.884 มิลลิกรัม/กรัม และถ่านกัมมันต์มีค่า เท่ากับ 3.256 2.998 และ 2.724 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่ง จะเห็นได้ว่ากระช้ำมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงสุดมากกว่าถ่านกัมมันต์ แต่มีความสามารถในการดูดซับทองแดง และสังกะสีสูงสุดน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของกระช้ำและถ่านกัมมันต์

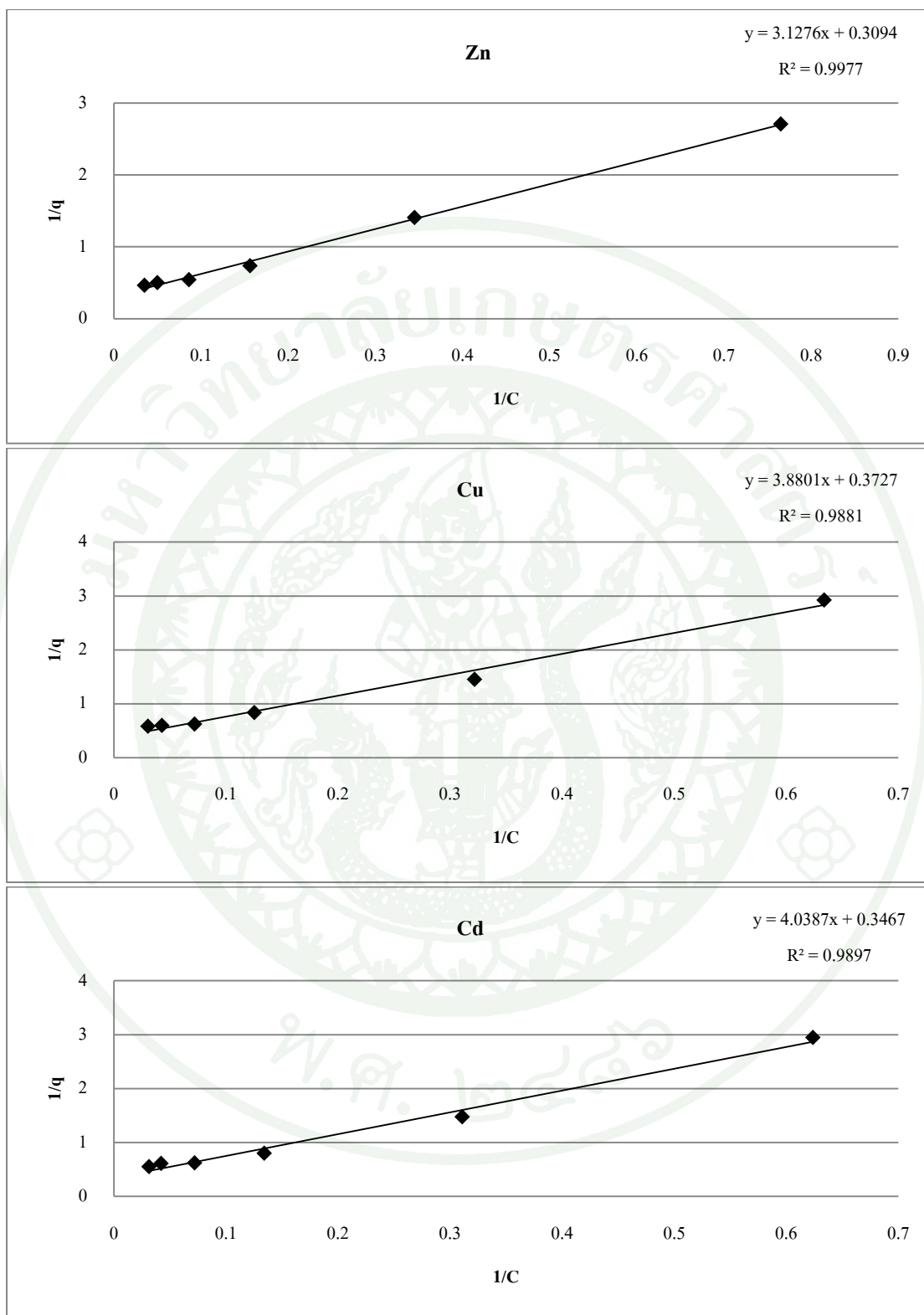
ไอโซเทอร์ม แบบแลงเมียร์	สังกะสี		ทองแดง		แคดเมียม	
	กระช้ำ	ถ่านกัมมันต์	กระช้ำ	ถ่านกัมมันต์	กระช้ำ	ถ่านกัมมันต์
q_m (mg/g)	3.232	3.256	2.683	2.998	2.884	2.724
K_L (L/mg)	0.0989	0.0963	0.096	0.129	0.0858	0.108
R^2	0.9977	0.9959	0.9881	0.9898	0.9897	0.9988



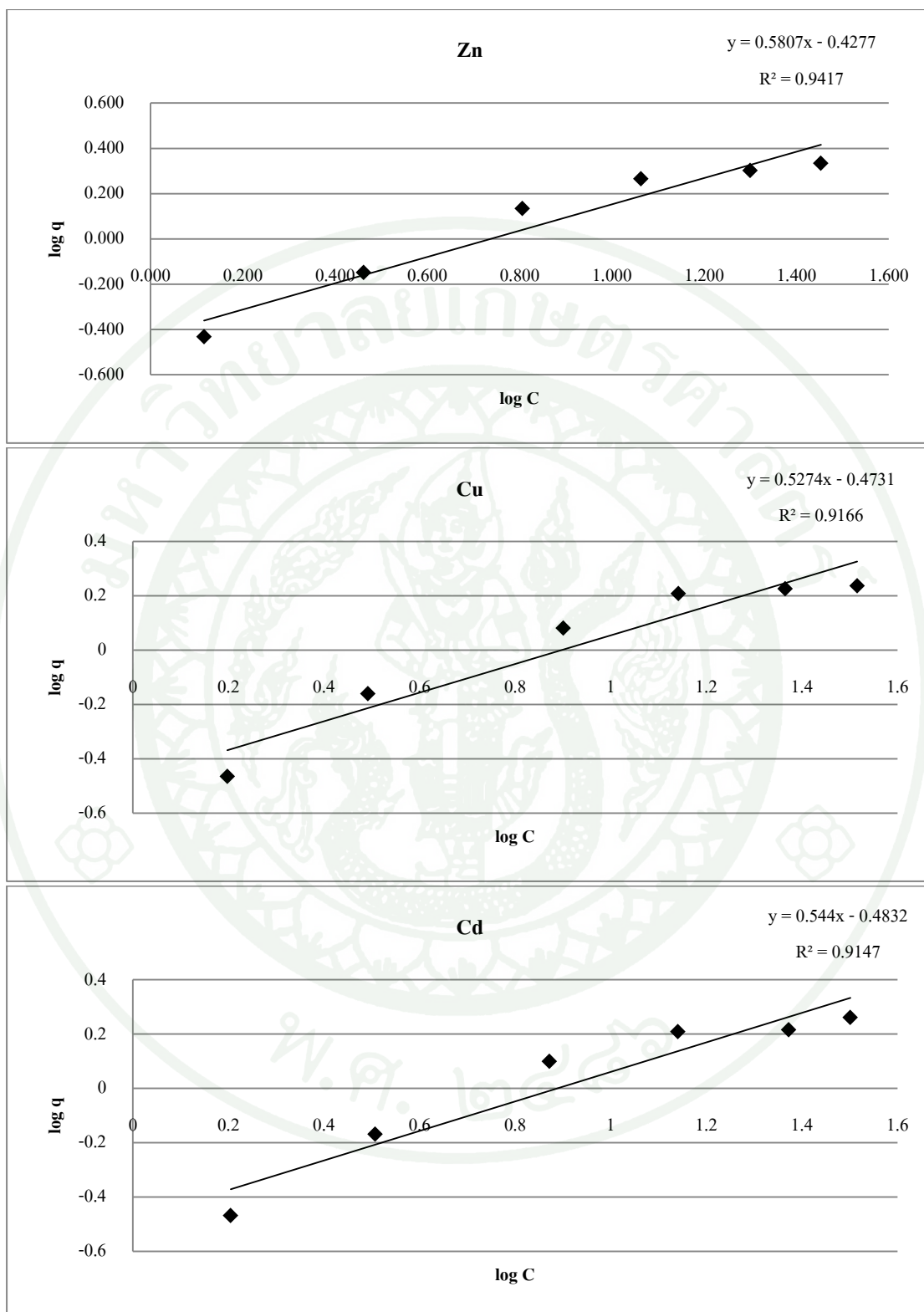
ภาพที่ 23 ผลของความเข้มข้น โลหะหนักต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระช้ำ



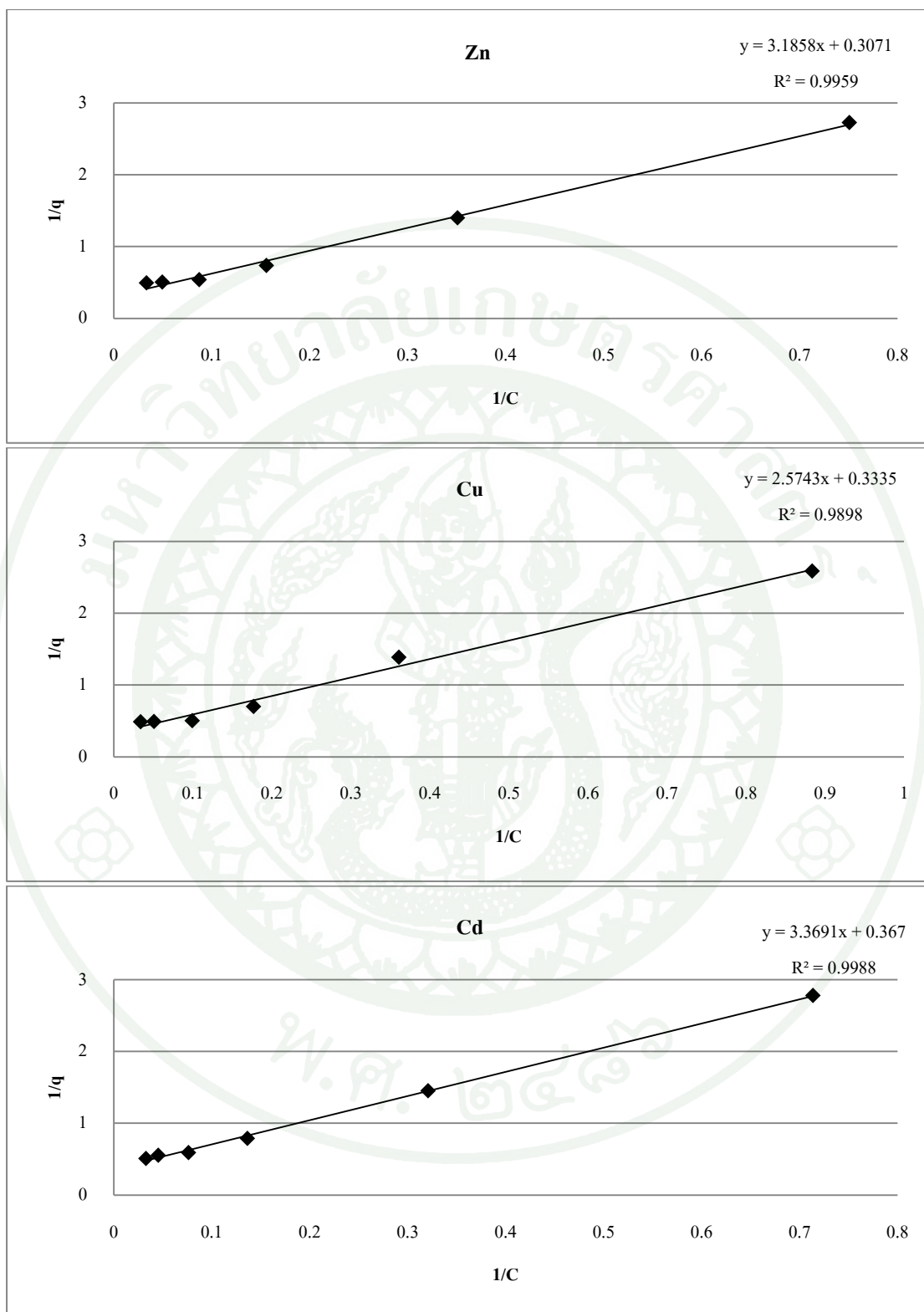
ภาพที่ 24 ผลของความเข้มข้น โลหะหนักต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยถ่านกัมมันต์



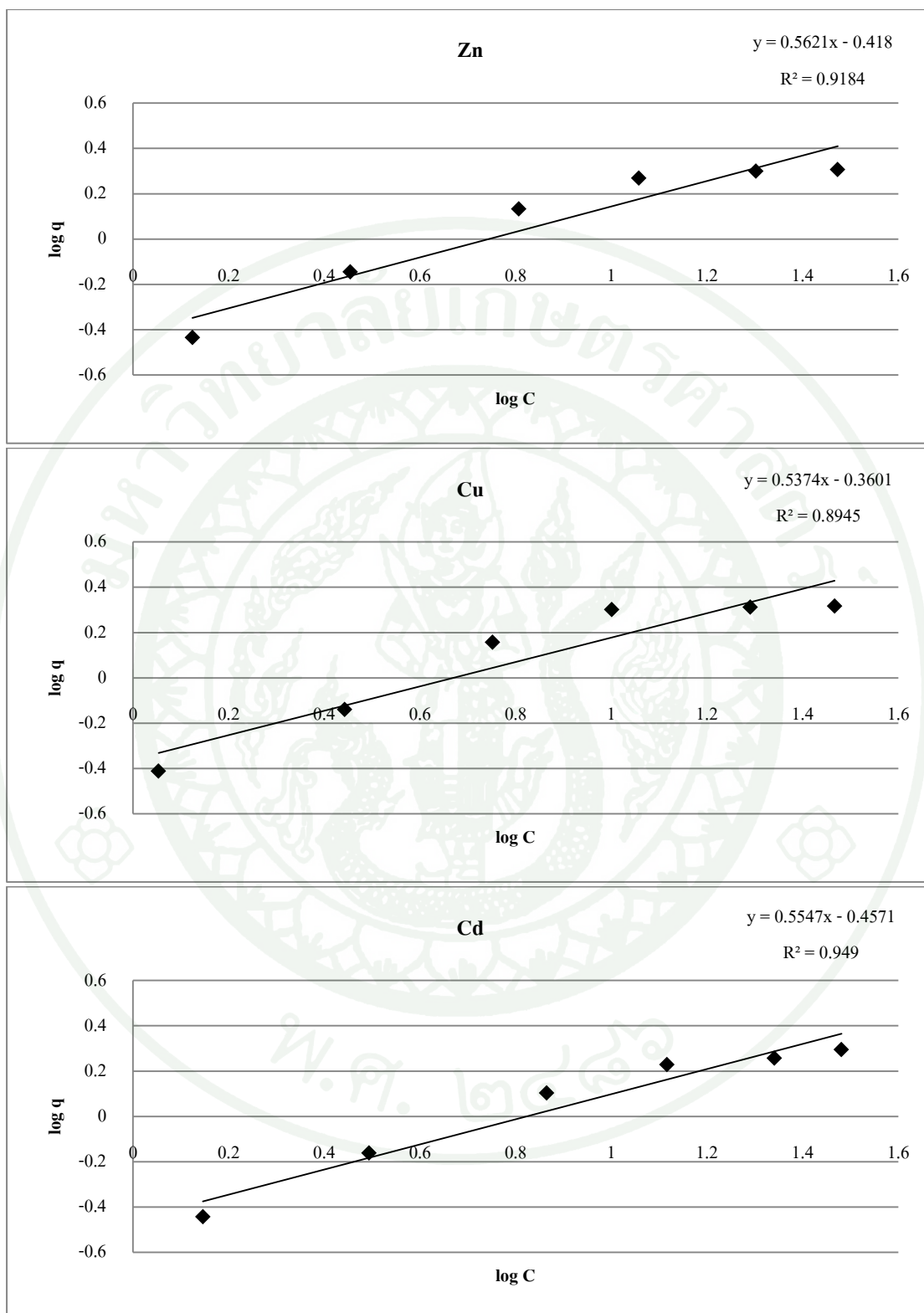
ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของกระช้ำ



ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนคลิซของกระช้ำ



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนคลิซของถ่านกัมมันต์

4.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ดูดซับของกระช้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

นำข้อมูลจาก การศึกษาความสามารถในการดูดซับของกระช้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ นำมาใส่ในแบบจำลอง Pseudo-first order และแบบจำลอง Pseudo-second order เพื่อหาค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาและพิจารณาความสอดคล้องของแต่ละแบบจำลองจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

แบบจำลองทั้งสองสมการ ใช้ ในการอธิบาย อัตราเร็วของการดูดซับซึ่งประกอบ ด้วยการแพร่ที่ฟิล์มภายนอก การดูดซับและการแพร่ภายในรูพรุน ความถูกต้องของผลการทดลองตรวจสอบได้ จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pseudo-second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า Pseudo-first order ในทุกกรณี เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วพบว่า Pseudo-second order อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ pseudo-first order ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกว่า pseudo-first order โดยมีค่า k_2 ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง แคดเมียมของกระช้ำเท่ากับ 0.821 1.698 และ 0.053 กรัม/มิลลิกรัม-นาที่ และอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (h) เท่ากับ 4.932 15.405 และ 0.354 มิลลิกรัม/กรัม-นาที่ ตามลำดับ ในส่วนของถ่านกัมมันต์ จลนศาสตร์ดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order เช่นเดียวกับกระช้ำ โดยมีค่า k_2 ในการดูดซับสังกะสี ทองแดง แคดเมียม เท่ากับ 0.345 0.262 และ 0.140 กรัม/มิลลิกรัม-นาที่ และอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (h) เท่ากับ 3.286 1.956 และ 1.039 มิลลิกรัม/กรัม-นาที่ ตามลำดับ (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 จลนศาสตร์ดูดซับของกระช้ำและถ่านกัมมันต์

จลนศาสตร์การดูดซับ		ชนิดของโลหะหนัก					
		สังกะสี		ทองแดง		แคดเมียม	
		กระช้ำ	ถ่านกัม มันต์	กระช้ำ	ถ่านกัม มันต์	กระช้ำ	ถ่านกัม มันต์
Pseudo- first order	$q_e(\text{cal})$ (mg/g)	2.569	2.745	2.337	2.456	1.292	1.854
	$q_e(\text{exp})$ (mg/g)	2.640	3.292	2.730	2.840	2.530	2.620
	k_1 (min ⁻¹)	0.002	0.001	0.003	0.003	0.005	0.001
	R^2	0.594	0.103	0.367	0.203	0.617	0.018
Pseudo- second order	$q_e(\text{cal})$ (mg/g)	2.451	3.086	3.012	2.732	2.584	2.725
	$q_e(\text{exp})$ (mg/g)	2.640	3.292	2.730	2.840	2.530	2.620
	k_2 (g/mg-min)	0.821	0.345	1.698	0.262	0.053	0.140
	R^2	0.983	0.981	0.991	0.991	0.998	0.980
	h (mg/g-min)	4.932	3.286	15.405	1.956	0.354	1.039

5. การศึกษาการนำกระช้ำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำจากโรงงานชุบโลหะ

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี ไอออน ทองแดง ไอออน และแคดเมียม ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 มาทำการทำการดูดซับผ่านคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ขนาด 1 เมตร ที่ภายในบรรจุ กระช้ำขนาดอยู่ระหว่าง 2-4.275 มิลลิเมตร สูง 50 เซนติเมตรดั่งนั้นปริมาตรของถ่านกัมมันต์ 1 BV เท่ากับ 0.253 ลิตร ปรับอัตราการไหลที่ 1.5 มิลลิลิตรต่ออนาที และทำการเก็บทุกๆ ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ สังกะสี ไอออน ทองแดง ไอออน และแคดเมียม ไอออน ที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ โดยทำการซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นนำน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเมืองทองธานีมาทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้นซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ พบว่ามีค่าพีเอชเท่ากับ 5.45 ปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 43.23 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี 45.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และทองแดง 43.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า พีเอชมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วน

ปริมาณโลหะหนักนั้น มีค่าน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 7 และทำการทดลองผ่านคอลัมน์ โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

อายุการใช้งาน เมื่อต้องการให้คุณภาพน้ำที่ได้ออกมามีค่าไม่เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม คือ แคลเซียมต้องไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี ต้องไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและทองแดงต้องไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมาตรฐานมีค่าที่แตกต่างกันมากทำให้อายุการใช้งานต่างกันมาก คือแคลเซียมจะมีอายุการใช้งาน อยู่ที่ประมาณ 3 ชั่วโมง สังกะสีอยู่ที่ประมาณ 11 ชั่วโมง และทองแดงอยู่ที่ประมาณ 7 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงพบว่า ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงอายุการใช้งานจนกระทั่งเข้มข้นของโลหะหนักน้ำที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับน้ำที่ออกจากระบบ จะพบว่า ทองแดง จะมีอายุการใช้งานมากที่สุด รองลงมา สังกะสีคือ และแคลเซียม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก กระจก้ามีความสามารถในการดูดซับทองแดง มากกว่า สังกะสี และแคลเซียมนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Ringqvist and Öborn (2002)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ หรืออายุการใช้งานการดูดซับผ่านคอลัมน์ระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับน้ำเสียจริง (ตารางที่ 8) พบว่า ทั้งน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน โดยน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 3-5 % ทั้งที่ความเข้มข้นของน้ำเสียจริงมีค่าน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในทฤษฎีควรจะมึประสิทธิภาพหรืออายุการใช้งานมากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ อาจเกิดจากมีโลหะหนักชนิดอื่นๆ หรือมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความขุ่น หรือสี มาทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคลเซียม ลดลงไปเล็กน้อย ดังภาพที่ 29 - 31

อายุการใช้งานแบบคอลัมน์ในการทดลองนี้นั้นน้อยเกินไปสำหรับการใช้งานจริง ดังนั้นจึงควรเพิ่มปริมาณกระจก้าให้มากขึ้น หรือลดอัตราการไหลลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโดยกระจก้ามากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์คุณภาพเบื้องต้นจากโรงงานอุตสาหกรรมเมืองทองอาลูมิเนียม

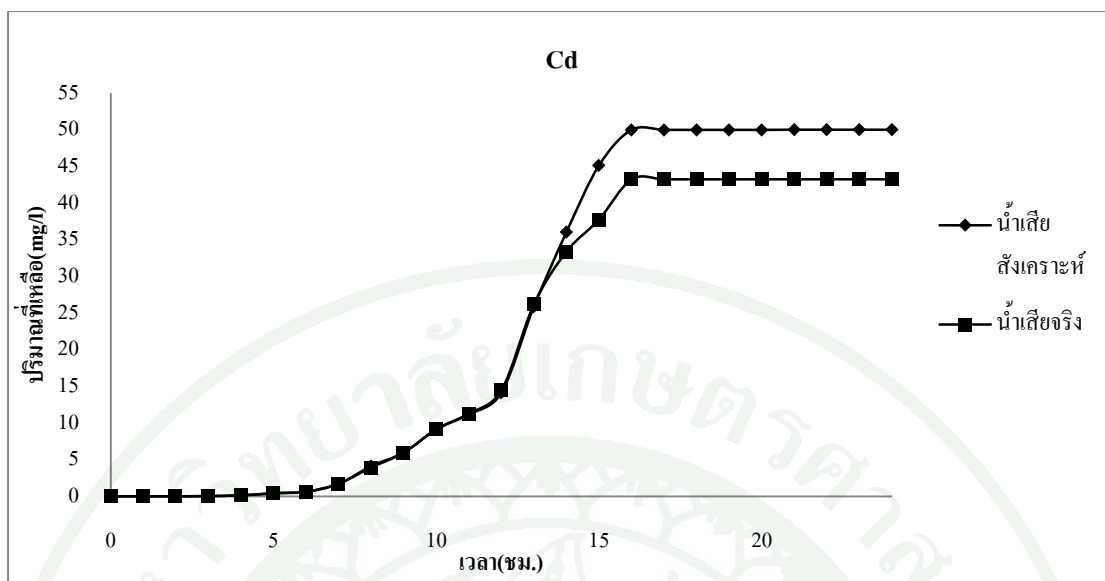
พารามิเตอร์	ค่าที่ได้
พีเอช	5.45
ความขุ่น	400 NTU
ค่าการนำไฟฟ้า	2356 us/cm
สังกะสี	45.00 mg/L
ทองแดง	43.25 mg/L
แคดเมียม	43.23 mg/L

ตารางที่ 8 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียม สังกะสี และทองแดง โดยใช้ถักถัมน้ำ

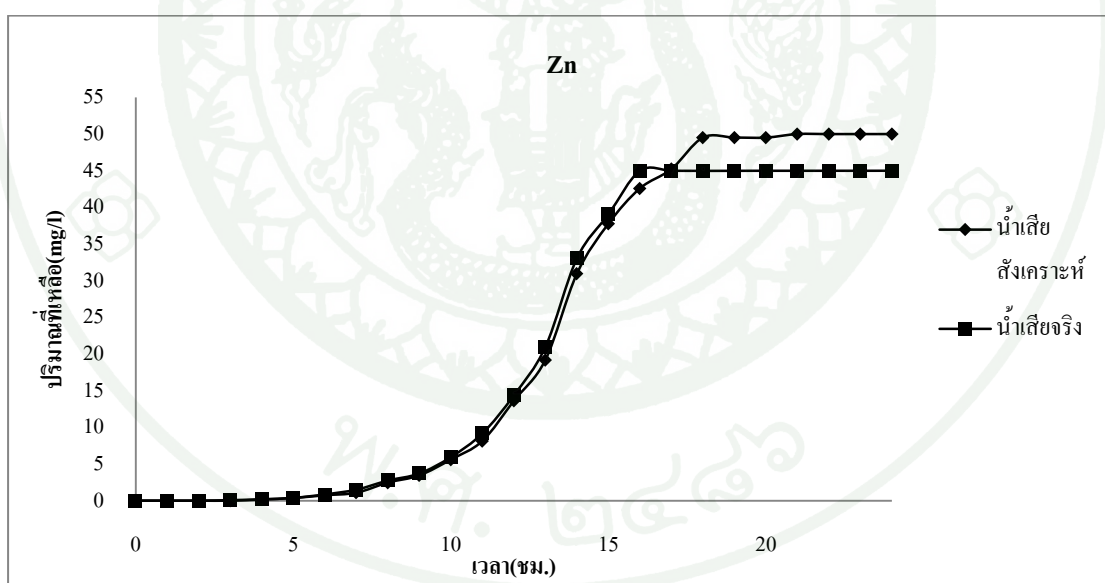
ปัจจัยที่ศึกษา	ชนิดของน้ำเสีย	ชนิดของโลหะหนัก		
		แคดเมียม	สังกะสี	ทองแดง
ปริมาณของวัสดุดูดติดผิว(กก.)	น้ำเสียสังเคราะห์	1.103	1.103	1.103
	น้ำเสียจริง	1.106	1.106	1.106
อายุการใช้งาน(ชั่วโมง) ^ก	น้ำเสียสังเคราะห์	3	7	11
	น้ำเสียจริง	3	7	11
อายุการใช้งาน(ชั่วโมง) ^ข	น้ำเสียสังเคราะห์	16	18	19
	น้ำเสียจริง	16	16	18
ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ (ลิตร)	น้ำเสียสังเคราะห์	0.27	0.63	0.99
	น้ำเสียจริง	0.27	0.63	0.99
ปริมาณกำจัดได้ (มก.)	น้ำเสียสังเคราะห์	13.5	31.5	49.5
	น้ำเสียจริง	13.5	31.5	49.5
ปริมาณกำจัดได้ต่อปริมาณวัสดุ ดูดติดผิว(มก/กก.)	น้ำเสียสังเคราะห์	0.12	0.29	0.45
	น้ำเสียจริง	0.12	0.28	0.45
Usage rate (กก./ลิตร)	น้ำเสียสังเคราะห์	4.09	1.75	1.11
	น้ำเสียจริง	4.10	1.76	1.12

หมายเหตุ ก อายุการใช้งานเมื่อต้องการให้คุณภาพน้ำที่ได้ออกมามีค่าไม่เกินมาตรฐาน

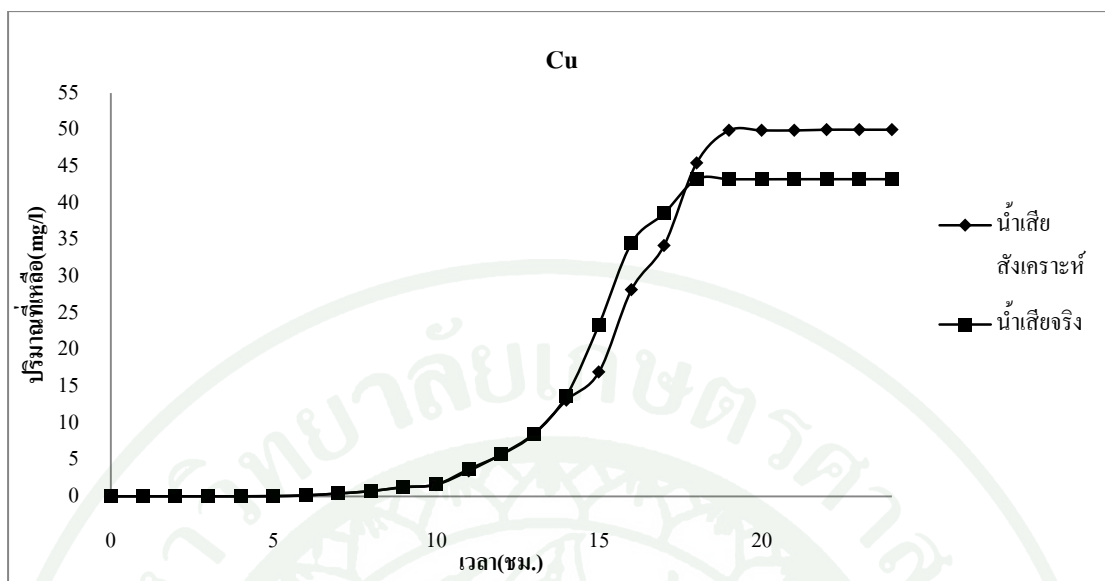
ข อายุการใช้งานเมื่อน้ำความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับน้ำที่ออกจากระบบ



ภาพที่ 29 ผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานเมืองทองอาลูมิเนียม



ภาพที่ 30 ผลการศึกษาการดูดซับสังกะสีผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานเมืองทองอาลูมิเนียม



ภาพที่ 31 ผลการศึกษาการดูดซับทองแดงผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียดังเคราะห์และน้ำเสียดังจากโรงงานเมืองทองอุตสาหกรรม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. กระช้ำ ที่มีอยู่ในจังหวัดสมุทรสาครซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นหอยสองฝาได้แก่ หอยลาย หอยตลับ และหอยแครง มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.6214 ตร.ม/กรัม ความหนาแน่น 1.5621 กรัม/มล. ขนาดรูพรุน 6,000 อังสตรอม ขนาดประสิทธิผล 0.28 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอเท่ากับ 7.27
2. สภาพที่เหมาะสมในการดูดซับ สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม แบบแบดซ์ คือ พีเอช 5 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ปริมาณ 0.25 กรัม ขนาด 2 - 4.275 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 26 ± 0.5 องศาเซลเซียส โดยสามารถลดปริมาณโลหะหนักได้ 40- 65 %
3. ไอโซเทอร์มในการดูดซับของกระช้ำมีความสอดคล้องกับแบบแลงเมียร์มากกว่าแบบฟรุนดิช และพบว่า กระช้ำมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงสุดมากกว่าถ่านกัมมันต์ แต่มีความสามารถในการดูดซับทองแดง และสังกะสีสูงสุดน้อยกว่าถ่านกัมมันต์
4. จลนศาสตร์ดูดซับของกระช้ำมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่า pseudo-first order เหมือนกับถ่านกัมมันต์ และกระช้ำมีอัตราเร็วของการดูดซับสังกะสีและทองแดงในช่วงเริ่มต้นสูงกว่าถ่านกัมมันต์ แต่น้อยกว่าในการดูดซับแคดเมียม
5. เมื่อทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักทั้งสามชนิดอยู่ด้วยกัน แล้วใช้วิธีการบำบัดแบบคอลัมน์ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า อายุการใช้งานจนหมดประสิทธิภาพ พบว่า การดูดซับทองแดงจะมีอายุการใช้งานมากที่สุด คือ 19 ชั่วโมง รองลงมาคือสังกะสีและแคดเมียม ที่ 18 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานเมื่อต้องการให้น้ำที่ออกมานั้นมีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) พบว่าอายุการใช้งานในการดูดซับสังกะสีจะยาวนานมากที่สุดคือ 11 ชั่วโมง รองลงมาคือทองแดงและแคดเมียมที่ 7 และ 3 ชั่วโมง เนื่องจากมาตรฐานที่กำหนดมีค่าแตกต่างกันมากคือ แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ไม่เกิน 0.03, 2.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

6. เมื่อทำการบำบัดแบบคอลัมน์ ด้วยน้ำเสียจริงจากโรงงานชุมชน โลหะพบว่า มีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งที่ควรมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเนื่องจากมีความเข้มข้นน้อยกว่าประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากมีโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่ไม่ได้ทำการศึกษา หรือมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความขุ่น หรือสี มาทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ลดลงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำกระช้ำที่มีอยู่ในจังหวัดอื่นๆ เช่น จังหวัดสมุทรสงคราม มาทำการศึกษาองค์ประกอบและศึกษาความสามารถในการดูดซับว่าจะมีความแตกต่างกันหรือไม่
2. ควรนำกระช้ำมาศึกษาความสามารถดูดซับในโลหะหนักชนิดอื่นๆ ซึ่งปัจจุบันพบว่ามี การปนเปื้อนในแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น เช่น ตะกั่ว ปรอท เป็นต้น
3. ควรนำกระช้ำมาทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสี หรือลดความขุ่นของน้ำเสีย
4. ควรศึกษาถึงองค์ประกอบของกระช้ำหลังจากการดูดซับ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร
5. ควรทำการศึกษาต่อถึงวิธีการฟื้นฟูสภาพกระช้ำที่หมดอายุการใช้งานการดูดซับแล้ว ว่าสามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้หรือไม่ และได้ด้วยวิธีการใด และถ้าไม่คุ้มกับการลงทุน ควรจะเอากระช้ำเหล่านี้ไปทำอะไรต่อ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2539. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539). แหล่งที่มา: http://www3.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/bers/gasohol_documents/Attach_5_Waste_w ater_treatment.pdf, 10 กุมภาพันธ์ 2555.

กรมส่งเสริมวัฒนธรรม. 2555. กระจ้า. แหล่งที่มา: http://kanchanapisek.culture.go.th/thai/index.php?option=com_content&view=article&id=794%3A2553-04-20-11-%25M%25S&catid=256%3A2553-04-20-06-m-s&Itemid=63, 10 กุมภาพันธ์ 2555.

กลุ่มสถิติและสารสนเทศการประมง. 2543. สถิติผลผลิตสัตว์ทะเลประเภทหอยและอื่น ๆ ประจำปี 2541. กองเศรษฐกิจกรมประมง กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ตยาภิ ตรงสถิตกุล. 2547. การลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้เปลือกไข่ เปลือกหอยลาย และถั่วแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บพิช จารุพันธุ์ และ นันทพร จารุพันธุ์. 2538. สัตววิทยา (Zoology). รุ่งรัตนาคารพิมพ์, กรุงเทพฯ.

พรพิมล ห่อสุวรรณชัย. 2542. การบำบัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียชุมชนโดยวิธีหุ้กรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรพิมล พัดภู. 2547. การกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยการใช้หินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ภารดี คะลา. 2541. สักยภาพของแม่น้ำเพชรบุรีต่อการรองรับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพร ฐิริพงษ์ และ สม โภชน์ อัครกะทิวัดณ์. 2535. ภาพปลาและสัตว์น้ำของไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สาโรจน์ เริ่มคำริห์, สาวิตรี แกเรียส และ เกริก วงศ์สอนธรรม. 2552. การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำและตะกอนดินบริเวณชายฝั่งทะเลของอ่าวไทยตอนบน. ใน รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สาธิตา แสงสัมฤทธิ์ และ ฤดีรัตน์ ภววงษ์ศักดิ์. 2546. การบำบัด Cd (II) และ Ni (II) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตะกอนและน้ำชะตะกอนจากโรงกรองน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี.

สิทธิชัย ต้นธนะสฤยดี. 2528. พืชวิทยาสิ่งแวดล้อม. โครงการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อภิชาติ โพธิ์สุ. 2536. ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในน้ำ และดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำเลย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรพินท์ จันทร์ผ่องแสง. 2550. ปริมาณการสะสมของโลหะหนักบางชนิดตามเนื้อเยื่อต่างๆ ของปลาทะเล ในเนื้อสัตว์ทะเลบางชนิดในอ่าวไทยซึ่งมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Berman. 1980. **Heavy Metal Analysis in the River Tigris.** Copper in toxic Metals and Their Analysis Chapter 12. Available Source: <http://gis.esri.com/geography.wssd.project2002.1289project.pdf>, April 10, 2007.

- Booolootian, R.A. and K.A. Stiles. 1979. **College Zoology**. 9th ed. Macmillan Publ. Co.Inc., New York.
- Bruland, K.W., Knauer, G.A. and Martin, J.H. 1978. Zinc in North-east Pacific Water. **Nature J.** 271: 741-743.
- Davies, N.T. 1980. Studies on the adsorption of zinc by rat intestine Br. **Journal of Nutri.** 43: 189-203.
- Dong Seog Kim. 2003. The removal by crab shell of mixed heavy metal ions in aqueous solution. **bioresource technology** 87 :355–357.
- Eckenfelder, W.W., Jr. 1989. **Industrial Water Pollution Control**. 2nd ed (n.p.), McGraw-Hill.
- Eisenberg, M. and J.J. Topping. 1980. Trace metal residences in shellfish from Maryland water. **Journal of Environ.Sci. Health.** 19(7): 649-671.
- Enk, M.D. and B.J.Mathis . 1977. Distribution of Cadmium and Lead in Stream Ecosystem. **Hydrobiological J.** 52: 153-158.
- Faust, S.D. and O.M. Aly. 1998. **Chemistry of Water Treatment**. 2 nd ed. Ann Arbor Press, Inc. Michigan, United State of America.
- Frenet, M. 1981 . The Distribution of Mercury , Cadmium and Lead between Water and Suspended Matter in the Loire Estuary as a Function of the Hydrological Regime. **Water Residue J.** 15: 1345-1350.
- Gachter, R. and H. Muller. 1990. **Plastics Additives Handbook**. 3rd ed. Hanser Publ.Co. Inc., New York.

Gauss, J.D., P.E. Woods. R.W. Winner and J.H.Skillings . 1985. Acute toxicity of copper to three life stages of chironomous tentans as affected by water hardness alkalinity
Environmental Pollutance Ser. A37: 149-157.

Goyer, R.A. 1996. **Toxic Effects of Metals.** In C.D. Klaassen (ed.).Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 5th McGraw-Hill, New York.

H. K. AN, B. Y. PARK and D. S. KIM.2001. **CRAB SHELL FOR THE REMOVAL OF HEAVY METALS FROM AQUEOUS SOLUTION.** Wat. Res. 35: 3551–3556.

Hodgson, J.F. 1963. **Chemistry of Micronutrient Elements in Soils.** In advances in Agronomy 15, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

Howarth, R.S. and J.B. Sprague . 1978. Copper lethality to rainbow trout in waters of various hardness and pH. **Wet. Res.** 12: 455-462.

Li Chenxi and Pascale Champagne.2009. Fixed-bed column study for the removal of cadmium (II) and nickel (II) ions from aqueous solutions using peat and mollusk shells. **Journal of Hazardous Materials** 171 :872–878.

Logan. T. J. and R.E. Feltz. 1985. Plant uptake of cadmium from acid extracted anaerobically digested sewage sludge. **J. Environ. Qual.** 14 (4): 495-500.

McNeely, R.N., V.P. Neimanis and L.Dwyer . 1979 . **Water Quality Source Book a Guide to Water Quality Parameter.** Inland Water. Directorate, Water Quality Branch,Ottawa.

Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse.**3 rd ed. McGraw-Hill, Inc., New York.

Mount, D.I. 1968. **Chronic Toxicity of copper to fathead minnows (*Pimephales promelas* Rafinesque)**. *Marine Pollution J.* 11: 93-101.

Nriagu, J.O. 1980. **Zinc in the Atmosphere**. In J.O. Nriagu (ed.). *Zinc in the Environment Part I: Ecological Cycling*. John Wiley & Sons, New York.

Ringqvist, L and Oborn, I. 2002. Copper and Zinc adsorption onto poorly humidified sphagnum and carex peat. **Water research**. 36 :2233-2242

Viriya-empikul N. , P. Krasae , W. Nualpaeng , B. Yoosuk and K. Faungnawakij .2012. Biodiesel production over Ca-based solid catalysts derived from industrial wastes. **Fuel**. 92:239-244

Wilbur, K.M. 1964. **Physiology of Mollusca**. Academic Press, New York.

Wood, J. M. 1975. **Metabolic Cycles for Toxic Elements in the Environment**. A study of Kinetic and Mechanism. In P.Q.Krenel (ed). *Heavy metals in the Aquatic Environment*. Pergamon Press. Oxford.

Yang Du, Fei Lian and Lingyan Zhu. 2011. Biosorption of divalent Pb, Cd and Zn on aragonite and calcite mollusk shells. **Environmental Pollution** 159 :1763-1768.

Yang Du, Lingyan Zhu and Guoqiang Shan. 2012. Removal of Cd²⁺ from contaminated water by nano-sized aragonite mollusk shell and the competition of coexisting metal ions. **Journal of Colloid and Interface Science** 367 : 378–382.



ภาคผนวก

ข้อมูลการทดลองการบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ)

ตารางผนวกที่ 1 องค์ประกอบของกระช้ำ

ชนิดของเปลือกหอย	น้ำหนัก(กรัม)	ปริมาณ(ร้อยละ)
หอยลาย	158.80	31.76
หอยตลับ	118.24	23.65
หอยแครง	94.07	18.81
หอยแมลงภู่	29.86	5.97
หอยกะพง	11.63	2.33
หอยฝาเดียว	47.66	9.53
เพรียงหิน	39.74	7.95
รวม	500.00	100.00

ตารางผนวกที่ 2 ขนาดและปริมาณของกระช้ำ

เบอร์ ตะแกรง	ขนาด ช่องว่าง (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก		เปลือกหอย (กรัม)	ร้อยละ	ร้อยละ สะสม
		ตะแกรงก่อน ร่อน(กรัม)	น้ำหนักตะแกรง หลังร่อน(กรัม)			
#200	0.075	299.18	299.66	0.48	0.10	0.10
#100	0.15	315.66	318.57	2.91	0.58	0.68
#40	0.425	339.27	421.47	82.20	16.44	17.12
#10	2	425.82	636.69	210.87	42.17	59.29
#4	4.75	471.18	615.79	144.61	28.92	88.21
3/8"	9.5	472.86	531.79	58.93	11.79	100.00

ตารางผนวกที่ 3 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที

ชนิดของโลหะหนัก	pH	น้ำหนัก		ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
		ซ้ำที่	ตัวอย่าง (กรัม)				
สังกะสี	3	1	0.25	23.70	52.60	2.63	0.03
		2	0.25	23.59	52.82		
		3	0.25	23.68	52.64		
สังกะสี	5	1	0.25	22.79	54.42	2.70	0.01
		2	0.25	23.27	53.46		
		3	0.25	22.68	54.64		
ทองแดง	3	1	0.25	26.10	47.80	2.37	0.03
		2	0.25	26.11	47.78		
		3	0.25	26.58	46.84		
ทองแดง	5	1	0.25	23.46	53.08	2.63	0.04
		2	0.25	23.79	52.42		
		3	0.25	23.66	52.68		
แคดเมียม	3	1	0.25	21.70	56.60	2.82	0.01
		2	0.25	21.60	56.80		
		3	0.25	22.07	55.86		
แคดเมียม	5	1	0.25	21.37	57.26	2.87	0.02
		2	0.25	21.26	57.48		
		3	0.25	21.27	57.46		

ตารางผนวกที่ 4 ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่ความเร็วรอบ ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที

ชนิดของ โลหะหนัก	ระยะเวลาปั่น กวน(นาที)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ		โลหะหนักที่	
				เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ถูกกำจัด (mg/g)	SD
สังกะสี	30	1	0.25	23.89	52.22	2.61	0.01
		2	0.25	23.84	52.32		
		3	0.25	23.65	52.70		
สังกะสี	60	1	0.25	23.33	53.34	2.66	0.02
		2	0.25	23.44	53.12		
		3	0.25	23.38	53.24		
สังกะสี	90	1	0.25	23.46	53.08	2.66	0.01
		2	0.25	23.39	53.22		
		3	0.25	23.24	53.52		
สังกะสี	120	1	0.25	23.51	52.98	2.63	0.01
		2	0.25	23.88	52.24		
		3	0.25	23.62	52.76		
ทองแดง	30	1	0.25	26.59	46.82	2.36	0.02
		2	0.25	26.12	47.76		
		3	0.25	26.24	47.52		
ทองแดง	60	1	0.25	25.66	48.68	2.44	0.01
		2	0.25	25.48	49.04		
		3	0.25	25.45	49.10		
ทองแดง	90	1	0.25	25.84	48.32	2.42	0.04
		2	0.25	25.74	48.52		

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ระยะเวลาปั่น กวน(นาที)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด (mg/g)	SD
ทองแดง	120	3	0.25	25.75	48.50	2.36	0.01
		1	0.25	26.75	46.50		
		2	0.25	26.11	47.78		
แคดเมียม	30	3	0.25	26.17	47.66	2.77	0.01
		1	0.25	22.16	55.68		
		2	0.25	22.26	55.48		
แคดเมียม	60	3	0.25	22.37	55.26	2.85	0.02
		1	0.25	21.60	56.80		
		2	0.25	21.40	57.20		
แคดเมียม	90	3	0.25	21.30	57.40	2.85	0.02
		1	0.25	21.67	56.66		
		2	0.25	21.29	57.42		
แคดเมียม	120	3	0.25	21.45	57.10	2.81	0.02
		1	0.25	22.05	55.90		
		2	0.25	21.76	56.48		
		3	0.25	21.63	56.74		

ตารางผนวกที่ 5 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที

ชนิดของโลหะหนัก	ระยะเวลาสัมผัส		ความเข้มข้นที่				SD
	(นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักรวบรวมตัวอย่าง	เหลือ	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	
สังกะสี	30	1	0.25	24.23	51.54	2.57	0.01
		2	0.25	24.31	51.38		
		3	0.25	24.29	51.42		
สังกะสี	60	1	0.25	23.52	52.96	2.64	0.00
		2	0.25	23.61	52.78		
		3	0.25	23.49	53.02		
สังกะสี	90	1	0.25	23.85	52.30	2.62	0.01
		2	0.25	23.63	52.74		
		3	0.25	23.76	52.48		
สังกะสี	120	1	0.25	24.11	51.78	2.60	0.02
		2	0.25	23.84	52.32		
		3	0.25	23.79	52.42		
ทองแดง	30	1	0.25	25.69	48.62	2.48	0.04
		2	0.25	24.92	50.16		
		3	0.25	24.98	50.04		
ทองแดง	60	1	0.25	24.82	50.36	2.53	0.02
		2	0.25	24.62	50.76		
		3	0.25	24.33	51.34		
ทองแดง	90	1	0.25	25.67	48.66	2.41	0.02
		2	0.25	25.84	48.32		

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ระยะเวลา		ความ				โลหะหนักที่ถูก กำจัด(mg/g)	SD
	สัมผัส (นาท)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	กำจัด(mg/g)		
ทองแดง	120	3	0.25	26.01	47.98			
		1	0.25	27.76	44.48	2.22	0.02	
		2	0.25	27.95	44.10			
แคดเมียม	30	3	0.25	27.51	44.98			
		1	0.25	23.26	53.48	2.68	0.03	
		2	0.25	23.01	53.98			
แคดเมียม	60	3	0.25	23.02	53.96			
		1	0.25	22.58	54.84	2.78	0.04	
		2	0.25	21.81	56.38			
แคดเมียม	90	3	0.25	22.00	56.00			
		1	0.25	22.43	55.14	2.76	0.02	
		2	0.25	22.03	55.94			
แคดเมียม	120	3	0.25	22.62	54.76			
		1	0.25	22.19	55.62	2.76	0.01	
		2	0.25	22.20	55.60			
		3	0.25	22.47	55.06			

ตารางผนวกที่ 6 ผลของน้ำหนักตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม
ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการ
สัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที

ชนิดของ โลหะหนัก	น้ำหนัก		ความ		โลหะหนักที่		SD
	กระช้ำ (กรัม)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ถูกกำจัด (mg/g)	
สังกะสี	0.25	1	0.25	24.08	51.84	2.58	0.02
		2	0.25	24.24	51.52		
		3	0.25	23.99	52.02		
สังกะสี	0.5	1	0.50	23.68	52.64	1.31	0.01
		2	0.50	23.87	52.26		
		3	0.50	23.98	52.04		
สังกะสี	0.75	1	0.75	23.21	53.58	0.90	0.01
		2	0.75	23.13	53.74		
		3	0.75	22.99	54.02		
สังกะสี	1.00	1	1.00	22.42	55.16	0.69	0.01
		2	1.00	22.29	55.42		
		3	1.00	22.55	54.90		
ทองแดง	0.25	1	0.25	25.00	50.00	2.49	0.02
		2	0.25	24.94	50.12		
		3	0.25	25.23	49.54		
ทองแดง	0.5	1	0.50	24.83	50.34	1.25	0.02
		2	0.50	25.24	49.52		
		3	0.50	24.97	50.06		
ทองแดง	0.75	1	0.75	24.06	51.88	0.86	0.02
		2	0.75	24.38	51.24		

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	น้ำหนัก		ความ			โลหะหนักที่		
	กระช้ำ (กรัม)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ถูกกำจัด (mg/g)	SD	
ทองแดง	1.00	3	0.75	24.40	51.20	0.69	0.02	
		1	1.00	22.78	54.44			
		2	1.00	22.36	55.28			
แคดเมียม	0.25	3	1.00	22.61	54.78	2.80	0.02	
		1	0.25	21.72	56.56			
		2	0.25	22.14	55.72			
แคดเมียม	0.5	3	0.25	21.98	56.04	1.44	0.01	
		1	0.50	21.07	57.86			
		2	0.50	21.19	57.62			
แคดเมียม	0.75	3	0.50	21.20	57.60	0.99	0.01	
		1	0.75	20.24	59.52			
		2	0.75	20.44	59.12			
แคดเมียม	1.00	3	0.75	20.50	59.00	0.75	0.02	
		1	1.00	20.17	59.66			
		2	1.00	19.88	60.24			
			3	1.00	20.10	59.80		

ตารางผนวกที่ 7 ผลของขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที

ชนิดของโลหะหนัก	ขนาด(มม.)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด (mg/g)	SD
สังกะสี	>4.725	1	0.25	24.58	50.84	2.54	0.00
		2	0.25	24.60	50.80		
		3	0.25	24.65	50.70		
สังกะสี	2-4.725	1	0.25	23.34	53.32	2.63	0.02
		2	0.25	23.72	52.56		
		3	0.25	23.79	52.42		
สังกะสี	0.425-2	1	0.25	23.81	52.38	2.61	0.01
		2	0.25	23.95	52.10		
		3	0.25	23.88	52.24		
ทองแดง	>4.725	1	0.25	29.03	41.94	2.11	0.01
		2	0.25	28.85	42.30		
		3	0.25	28.77	42.46		
ทองแดง	2-4.725	1	0.25	26.09	47.82	2.39	0.01
		2	0.25	26.11	47.78		
		3	0.25	25.86	48.28		
ทองแดง	0.425-2	1	0.25	26.53	46.94	2.33	0.01
		2	0.25	26.74	46.52		
		3	0.25	26.74	46.52		
แคดเมียม	>4.725	1	0.25	22.14	55.72	2.81	0.03
		2	0.25	21.49	57.02		
		3	0.25	21.75	56.50		

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ขนาด(มม.)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละการ กำจัด	โลหะหนัก ที่ถูกกำจัด (mg/g)	SD
แคดเมียม	2-4.725	1	0.25	21.72	56.56	2.84	0.03
		2	0.25	21.27	57.46		
		3	0.25	21.75	56.50		
แคดเมียม	0.425-2	1	0.25	22.03	55.94	2.79	0.01
		2	0.25	22.17	55.66		
		3	0.25	22.03	55.94		

ตารางผนวกที่ 8 ผลชนิดเปลือกหอยที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที

ชนิดของ โลหะหนัก	ชนิดของ หอย	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละการ กำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	SD
สังกะสี	หอยลาย	1	0.25	23.90	52.20	2.58	0.04
		2	0.25	24.55	50.90		
		3	0.25	23.92	52.16		
สังกะสี	หอยแครง	1	0.25	23.82	52.36	2.62	0.01
		2	0.25	23.88	52.24		
		3	0.25	23.60	52.80		
สังกะสี	หอยตลับ	1	0.25	23.84	52.32	2.61	0.00
		2	0.25	23.90	52.20		
		3	0.25	23.81	52.38		
ทองแดง	หอยลาย	1	0.25	25.96	48.08	2.40	0.01

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ชนิดของ หอย	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละการ กำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	SD
		2	0.25	26.06	47.88		
		3	0.25	25.99	48.02		
ทองแดง	หอยแครง	1	0.25	26.66	46.68	2.34	0.01
		2	0.25	26.44	47.12		
		3	0.25	26.54	46.92		
ทองแดง	หอยตลับ	1	0.25	25.87	48.26	2.41	0.01
		2	0.25	25.88	48.24		
		3	0.25	25.72	48.56		
แคดเมียม	หอยลาย	1	0.25	21.39	57.22	2.86	0.03
		2	0.25	20.98	58.04		
		3	0.25	21.54	56.92		
แคดเมียม	หอยแครง	1	0.25	17.99	64.02	3.24	0.05
		2	0.25	17.05	65.90		
		3	0.25	17.44	65.12		
แคดเมียม	หอยตลับ	1	0.25	22.35	55.30	2.77	0.01
		2	0.25	22.21	55.58		
		3	0.25	22.11	55.78		

ตารางผนวกที่ 9 ผลของอุณหภูมิในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ในการกำจัดทองแดง สังกะสี และ แคดเมียม ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ของกระช้ำ

ชนิดของ โลหะหนัก	อุณหภูมิ (°C)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละการ กำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	SD
สังกะสี	30 ± 0.5	1	0.25	23.90	52.20	2.59	0.37
		2	0.25	24.55	50.90		
		3	0.25	23.92	52.16		
สังกะสี	26 ± 0.5	1	0.25	22.67	54.66	2.73	0.13
		2	0.25	22.58	54.84		
		3	0.25	22.84	54.32		
ทองแดง	30 ± 0.5	1	0.25	25.96	48.08	2.40	0.05
		2	0.25	26.06	47.88		
		3	0.25	25.99	48.02		
ทองแดง	26 ± 0.5	1	0.25	25.31	49.38	2.46	0.36
		2	0.25	25.74	48.52		
		3	0.25	25.02	49.96		
แคดเมียม	30 ± 0.5	1	0.25	28.41	43.18	2.21	0.75
		2	0.25	27.03	45.94		
		3	0.25	28.21	43.58		
แคดเมียม	26 ± 0.5	1	0.25	26.45	47.1	2.32	0.38
		2	0.25	26.84	46.32		
		3	0.25	27.21	45.58		

ตารางผนวกที่ 10 ผลของความเข้มข้นของสารละลายทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ของกระช้ำ

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น(มก./ล)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง	ความเข้มข้นที่		ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
				น้ำหนักรวบรวม	เหลือ			
สังกะสี	5	1	0.25	1.307	73.76	0.37	0.02	
		2	0.25	1.309				
		3	0.25	1.305				
สังกะสี	10	1	0.25	2.898	71.02	0.71	0.01	
		2	0.25	2.899				
		3	0.25	2.897				
สังกะสี	20	1	0.25	6.398	68.01	1.36	0.02	
		2	0.25	6.397				
		3	0.25	6.399				
สังกะสี	30	1	0.25	11.570	61.43	1.84	0.02	
		2	0.25	11.572				
		3	0.25	11.568				
สังกะสี	40	1	0.25	19.960	50.10	2.00	0.03	
		2	0.25	19.963				
		3	0.25	19.957				
สังกะสี	50	1	0.25	28.409	43.18	2.16	0.03	
		2	0.25	28.406				
		3	0.25	28.412				
ทองแดง	5	1	0.25	1.577	68.46	0.34	0.03	
		2	0.25	1.580				
		3	0.25	1.574				
ทองแดง	10	1	0.25	3.105	68.95	0.69	0.05	
		2	0.25	3.100				

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ความเข้มข้น เริ่มต้น(มก./ล)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ			SD
				เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	
ทองแดง	20	3	0.25	3.110			
		1	0.25	7.962	60.19	1.20	0.02
		2	0.25	7.964			
ทองแดง	30	3	0.25	7.960			
		1	0.25	13.870	53.76	1.61	0.07
		2	0.25	13.877			
ทองแดง	40	3	0.25	13.863			
		1	0.25	23.202	41.99	1.68	0.01
		2	0.25	23.201			
ทองแดง	50	3	0.25	23.203			
		1	0.25	32.787	30.43	1.72	0.02
		2	0.25	32.789			
แคดเมียม	5	3	0.25	32.785			
		1	0.25	1.603	67.94	0.34	0.03
		2	0.25	1.606			
แคดเมียม	10	3	0.25	1.600			
		1	0.25	3.215	67.85	0.68	0.02
		2	0.25	3.213			
แคดเมียม	20	3	0.25	3.217			
		1	0.25	7.443	62.78	1.26	0.01
		2	0.25	7.444			
แคดเมียม	30	3	0.25	7.442			
		1	0.25	13.831	53.89	1.62	0.03
		2	0.25	13.834			
		3	0.25	13.828			

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ความเข้มข้น เริ่มต้น(มก./ล)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ			SD
				เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	
แคดเมียม	40	1	0.25	23.585	41.04	1.64	0.03
		2	0.25	23.588			
		3	0.25	23.582			
แคดเมียม	50	1	0.25	31.746	36.51	1.68	0.02
		2	0.25	31.744			
		3	0.25	31.748			

ตารางผนวกที่ 11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ของถ่านกัมมันต์

ชนิดของ โลหะหนัก	ความเข้มข้น เริ่มต้น(มก./ล)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ			SD
				เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	
สังกะสี	5	1	0.25	1.332	73.36	0.37	0.01
		2	0.25	1.333			
		3	0.25	1.331			
สังกะสี	10	1	0.25	2.849	71.51	0.72	0.02
		2	0.25	2.851			
		3	0.25	2.847			
สังกะสี	20	1	0.25	6.410	67.95	1.36	0.03
		2	0.25	6.413			
		3	0.25	6.407			
สังกะสี	30	1	0.25	11.429	61.90	1.86	0.05
		2	0.25	11.425			

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ความเข้มข้น เริ่มต้น(มก./ล)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ			SD
				เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	
สังกะสี	40	3	0.25	11.434			
		1	0.25	20.080	49.80	1.99	0.02
		2	0.25	20.082			
สังกะสี	50	3	0.25	20.078			
		1	0.25	29.762	40.49	2.02	0.02
		2	0.25	29.760			
ทองแดง	5	3	0.25	29.764			
		1	0.25	1.131	77.38	0.39	0.02
		2	0.25	1.133			
ทองแดง	10	3	0.25	1.129			
		1	0.25	2.770	72.30	0.72	0.05
		2	0.25	2.775			
ทองแดง	20	3	0.25	2.765			
		1	0.25	5.650	71.75	1.44	0.04
		2	0.25	5.654			
ทองแดง	30	3	0.25	5.646			
		1	0.25	10.030	66.56	2.00	0.03
		2	0.25	10.033			
ทองแดง	40	3	0.25	10.027			
		1	0.25	19.531	51.17	2.05	0.02
		2	0.25	19.529			
ทองแดง	50	3	0.25	19.533			
		1	0.25	29.326	41.35	2.07	0.01
		2	0.25	29.325			
		3	0.25	29.327			

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ชนิดของ โลหะหนัก	ความเข้มข้น เริ่มต้น(มก./ล)	ซ้ำ ที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง	ความ			SD
				เข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	โลหะหนักที่ ถูกกำจัด(mg/g)	
แคดเมียม	5	1	0.25	1.401	71.98	0.36	0.01
		2	0.25	1.400			
		3	0.25	1.402			
แคดเมียม	10	1	0.25	3.115	68.85	0.69	0.03
		2	0.25	3.118			
		3	0.25	3.112			
แคดเมียม	20	1	0.25	7.326	63.37	1.27	0.02
		2	0.25	7.324			
		3	0.25	7.328			
แคดเมียม	30	1	0.25	13.072	56.43	1.69	0.04
		2	0.25	13.076			
		3	0.25	13.068			
แคดเมียม	40	1	0.25	21.930	45.18	1.81	0.03
		2	0.25	21.927			
		3	0.25	21.933			
แคดเมียม	50	1	0.25	30.303	39.39	1.97	0.03
		2	0.25	30.306			
		3	0.25	30.300			

ตารางผนวกที่ 12 ข้อมูลสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ชนิดของตัว ดูดซับ	ชนิดของโลหะ หนัก	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าความสามารถในการดูด ซับ(q)(mg/g)	ความเข้มข้นที่เหลือ ณ จุดสมดุล c(mg/l)	1/c	1/q	Log c	Log q
กระช้ำ	สังกะสี	5	0.369	1.307	0.765	2.707	0.116	-0.433
		10	0.710	2.898	0.345	1.408	0.462	-0.149
		20	1.360	6.398	0.156	0.735	0.806	0.134
		30	1.843	11.570	0.086	0.543	1.063	0.266
		40	2.004	19.960	0.050	0.499	1.300	0.302
ทองแดง	สังกะสี	5	0.342	1.577	0.634	2.922	0.198	-0.466
		10	0.690	3.105	0.322	1.450	0.492	-0.161
		20	1.204	7.962	0.126	0.831	0.901	0.081
		30	1.613	13.870	0.072	0.620	1.142	0.208
		40	1.680	23.202	0.043	0.595	1.366	0.225
แคดเมียม	สังกะสี	5	0.340	1.603	0.624	2.943	0.205	-0.469
		10	0.678	3.215	0.311	1.474	0.507	-0.168
		20	1.256	7.443	0.134	0.796	0.872	0.099

ตารางผนวกที่ 12 (ต่อ)

ชนิดของตัว ดูดซับ	ชนิดของโลหะ หนัก	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าความสามารถในการดูด ซับ(q)(mg/g)	ความเข้มข้นที่เหลือ ณ จุดสมดุล c(mg/l)	1/c	1/q	Log c	Log q
กระช้ำ	แคดเมียม	30	1.617	13.831	0.072	0.618	1.141	0.209
		40	1.642	23.585	0.042	0.609	1.373	0.215
		50	1.825	31.746	0.032	0.548	1.502	0.261
ถ่านกัมมันต์	สังกะสี	5	0.367	1.332	0.751	2.726	0.124	-0.436
		10	0.715	2.849	0.351	1.398	0.455	-0.146
		20	1.359	6.410	0.156	0.736	0.807	0.133
		30	1.857	11.429	0.088	0.538	1.058	0.269
		40	1.992	20.080	0.050	0.502	1.303	0.299
	50	2.024	29.762	0.034	0.494	1.474	0.306	
	ทองแดง	5	0.387	1.131	0.884	2.585	0.054	-0.412
		10	0.723	2.770	0.361	1.383	0.442	-0.141
		20	1.435	5.650	0.177	0.697	0.752	0.157
		30	1.997	10.030	0.100	0.501	1.001	0.300
40		2.047	19.531	0.051	0.489	1.291	0.311	

ตารางผนวกที่ 12 (ต่อ)

ชนิดของตัว ดูดซับ	ชนิดของโลหะ หนัก	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าความสามารถในการดูด ซับ(q)(mg/g)	ความเข้มข้นที่เหลือ ณ จุดสมดุล c(mg/l)	1/c	1/q	Log c	Log q
ถ่านกัมมันต์	ทองแดง	50	2.067	29.326	0.034	0.484	1.467	0.315
	แคดเมียม	5	0.360	1.401	0.714	2.778	0.146	-0.444
		10	0.688	3.115	0.321	1.452	0.493	-0.162
		20	1.267	7.326	0.137	0.789	0.865	0.103
		30	1.693	13.072	0.077	0.591	1.116	0.229
		40	1.807	21.930	0.046	0.553	1.341	0.257
		50	1.970	30.303	0.033	0.508	1.481	0.294

ตารางผนวกที่ 13 ความเข้มข้นที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับ ณ เวลาต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	ชนิดของโลหะหนัก	ซ้ำที่	ความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ (นาท)								
			0	15	30	45	60	75	90	120	180
กระช้ำ	สังกะสี	1	50.00	29.83	27.49	26.98	23.26	20.82	23.50	23.16	26.27
		2	50.00	30.11	27.78	26.90	23.55	20.71	23.60	23.54	26.73
		3	50.00	29.57	27.10	26.91	23.61	21.05	23.77	24.23	26.51
	ทองแดง	1	50.00	25.28	24.01	19.36	22.59	22.47	22.96	22.63	19.51
		2	50.00	25.35	24.29	19.09	22.96	22.28	23.03	22.75	19.84
		3	50.00	25.55	24.38	19.24	22.32	22.62	22.85	22.85	19.78
	แคลเซียม	1	50.00	26.13	25.83	24.35	24.69	23.29	23.66	24.33	24.77
		2	50.00	25.18	25.25	24.45	24.78	23.29	23.70	24.40	24.64
		3	50.00	25.40	25.43	25.08	24.48	22.51	23.36	24.12	23.88

ตารางผนวกที่ 13 (ต่อ)

ชนิดของตัวดูดซับ	ชนิดของโลหะหนัก	ซ้ำที่	ความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ (นาทึ)								
			0	15	30	45	60	75	90	120	180
ถ่านกัมมันต์	สังกะสี	1	50.00	29.50	20.03	20.63	17.01	16.69	16.36	16.08	20.35
		2	50.00	28.45	20.21	20.50	17.01	16.58	16.45	16.25	20.98
		3	50.00	28.28	20.49	20.56	17.11	16.54	16.33	16.00	21.13
	ทองแดง	1	50.00	33.68	22.30	23.49	22.14	22.26	21.18	21.67	23.59
		2	50.00	33.33	22.38	22.93	21.34	22.16	21.78	22.21	24.10
		3	50.00	32.88	22.33	23.23	21.11	21.77	21.65	22.13	23.60
	แกลบเมี่ยม	1	50.00	24.42	23.75	24.18	23.70	22.53	22.62	18.09	24.05
		2	50.00	24.82	22.78	23.10	23.90	22.79	22.92	18.11	24.72
		3	50.00	24.93	24.18	23.76	23.72	22.44	22.84	18.44	23.58

ตารางผนวกที่ 14 ข้อมูลผลการดูคั้งแคดเมียมผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์

เวลา (ชม.)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ
0	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.03	99.94	0.02	99.96	0.04	99.92	0.03	99.94
4	0.10	99.80	0.15	99.70	0.13	99.74	0.13	99.75
5	0.36	99.28	0.45	99.10	0.41	99.18	0.41	99.19
6	0.58	98.84	0.64	98.72	0.62	98.76	0.61	98.77
7	1.58	96.84	1.78	96.44	1.69	96.62	1.68	96.63
8	3.68	92.64	4.56	90.88	4.11	91.78	4.12	91.77
9	5.68	88.64	6.25	87.50	5.92	88.16	5.95	88.10
10	8.68	82.64	9.65	80.70	9.01	81.98	9.11	81.77
11	10.98	78.04	11.36	77.28	11.17	77.66	11.17	77.66
12	13.54	72.92	14.65	70.70	14.14	71.72	14.11	71.78
13	25.58	48.84	26.14	47.72	25.85	48.30	25.86	48.29
14	35.24	29.52	36.78	26.44	36.04	27.92	36.02	27.96
15	45.68	8.64	45.54	8.92	44.14	11.72	45.12	9.76
16	49.98	0.04	49.98	0.04	49.97	0.06	49.98	0.05
17	49.98	0.04	49.98	0.04	49.97	0.06	49.98	0.05
18	49.98	0.04	49.98	0.04	49.97	0.06	49.98	0.05
19	49.98	0.04	49.98	0.04	49.97	0.06	49.98	0.05
20	49.98	0.04	49.98	0.04	49.97	0.06	49.98	0.05
21	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
22	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
23	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
24	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00

ตารางผนวกที่ 15 ข้อมูลผลการดูดซับสังกะสีผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์

เวลา (ชม.)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ
0	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
4	0.15	99.70	0.18	99.64	0.17	99.67	0.17	99.67
5	0.28	99.44	0.41	99.18	0.39	99.22	0.36	99.28
6	0.78	98.44	0.72	98.56	0.71	98.58	0.74	98.53
7	1.24	97.52	1.03	97.94	0.98	98.04	1.08	97.83
8	2.56	94.88	2.03	95.94	2.79	94.42	2.46	95.08
9	3.52	92.96	3.21	93.58	3.61	92.78	3.45	93.11
10	5.74	88.52	5.24	89.52	5.84	88.32	5.61	88.79
11	8.01	83.98	7.99	84.02	8.42	83.16	8.14	83.72
12	13.21	73.58	13.02	73.96	14.65	70.70	13.63	72.75
13	19.21	61.58	18.16	63.68	20.21	59.58	19.19	61.61
14	30.14	39.72	30.18	39.64	32.54	34.92	30.95	38.09
15	38.85	22.30	35.21	29.58	39.24	21.52	37.77	24.47
16	42.35	15.30	42.21	15.58	43.21	13.58	42.59	14.82
17	45.21	9.58	45.32	9.36	45.15	9.70	45.23	9.55
18	49.23	1.54	49.56	0.88	49.78	0.44	49.52	0.95
19	49.23	1.54	49.56	0.88	49.78	0.44	49.52	0.95
20	49.23	1.54	49.56	0.88	49.78	0.44	49.52	0.95
21	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
22	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
23	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
24	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00

ตารางผนวกที่ 16 ข้อมูลผลการดูดซับทองแดงผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียสังเคราะห์

เวลา (ชม.)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ
0	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
4	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
5	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
6	0.11	99.78	0.15	99.70	0.13	99.74	0.13	99.74
7	0.34	99.32	0.45	99.10	0.38	99.24	0.39	99.22
8	0.68	98.64	0.74	98.52	0.72	98.56	0.71	98.57
9	0.98	98.04	1.56	96.88	1.23	97.54	1.26	97.49
10	1.54	96.92	1.64	96.72	1.56	96.88	1.58	96.84
11	3.45	93.10	3.54	92.92	3.42	93.16	3.47	93.06
12	5.68	88.64	5.78	88.44	5.74	88.52	5.73	88.53
13	7.98	84.04	8.94	82.12	8.64	82.72	8.52	82.96
14	12.47	75.06	13.54	72.92	13.26	73.48	13.09	73.82
15	16.57	66.86	17.23	65.54	16.98	66.04	16.93	66.15
16	28.21	43.58	29.14	41.72	27.21	45.58	28.19	43.63
17	35.15	29.70	34.21	31.58	33.21	33.58	34.19	31.62
18	45.86	8.28	46.25	7.50	44.26	11.48	45.46	9.09
19	49.95	0.10	49.86	0.28	49.88	0.24	49.90	0.21
20	49.95	0.10	49.86	0.28	49.88	0.24	49.90	0.21
21	49.95	0.10	49.86	0.28	49.88	0.24	49.90	0.21
22	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
23	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00
24	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00	50.00	0.00

ตารางผนวกที่ 17 ข้อมูลผลการดูคั้งแคดเมียมผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียจากโรงงาน

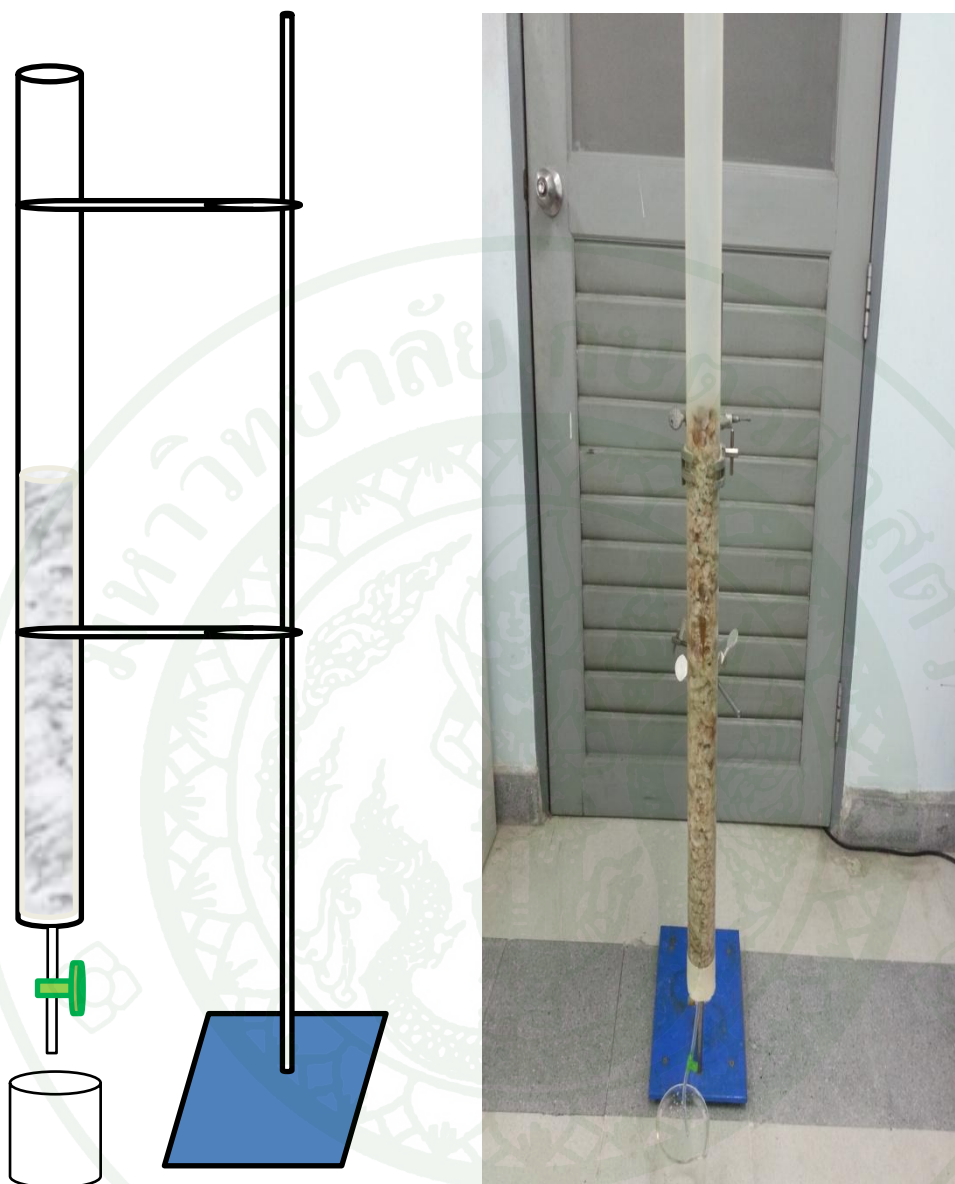
เวลา (ชม.)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิภ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ
0	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.04	99.91	0.03	99.93	0.03	99.93	0.03	99.92
4	0.11	99.75	0.15	99.65	0.13	99.70	0.13	99.70
5	0.39	99.10	0.44	98.98	0.43	99.01	0.42	99.03
6	0.60	98.61	0.66	98.47	0.65	98.50	0.64	98.53
7	1.61	96.28	1.87	95.68	1.70	96.07	1.73	96.01
8	3.72	91.40	3.89	91.01	4.13	90.45	3.91	90.95
9	5.78	86.64	6.25	85.55	5.84	86.50	5.96	86.23
10	8.74	79.80	9.65	77.69	9.05	79.08	9.15	78.86
11	11.23	74.04	11.36	73.74	11.24	74.02	11.28	73.93
12	14.26	67.04	14.65	66.13	14.38	66.76	14.43	66.64
13	26.14	39.57	26.14	39.57	26.21	39.41	26.16	39.52
14	33.23	23.19	33.78	21.91	33.08	23.53	33.36	22.88
15	37.47	13.38	37.87	12.46	37.88	12.44	37.74	12.76
16	43.22	0.09	43.23	0.07	43.24	0.05	43.23	0.07
17	43.22	0.09	43.23	0.07	43.24	0.05	43.23	0.07
18	43.23	0.07	43.23	0.07	43.24	0.05	43.23	0.06
19	43.23	0.07	43.23	0.07	43.24	0.05	43.23	0.06
20	43.23	0.07	43.24	0.05	43.24	0.05	43.24	0.05
21	43.23	0.07	43.24	0.05	43.24	0.05	43.24	0.05
22	43.23	0.07	43.24	0.05	43.24	0.05	43.24	0.05
23	43.23	0.07	43.24	0.05	43.24	0.05	43.24	0.05
24	43.23	0.07	43.24	0.05	43.24	0.05	43.24	0.05

ตารางผนวกที่ 18 ข้อมูลผลการดูดซับสังกะสีผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสียจากโรงงาน

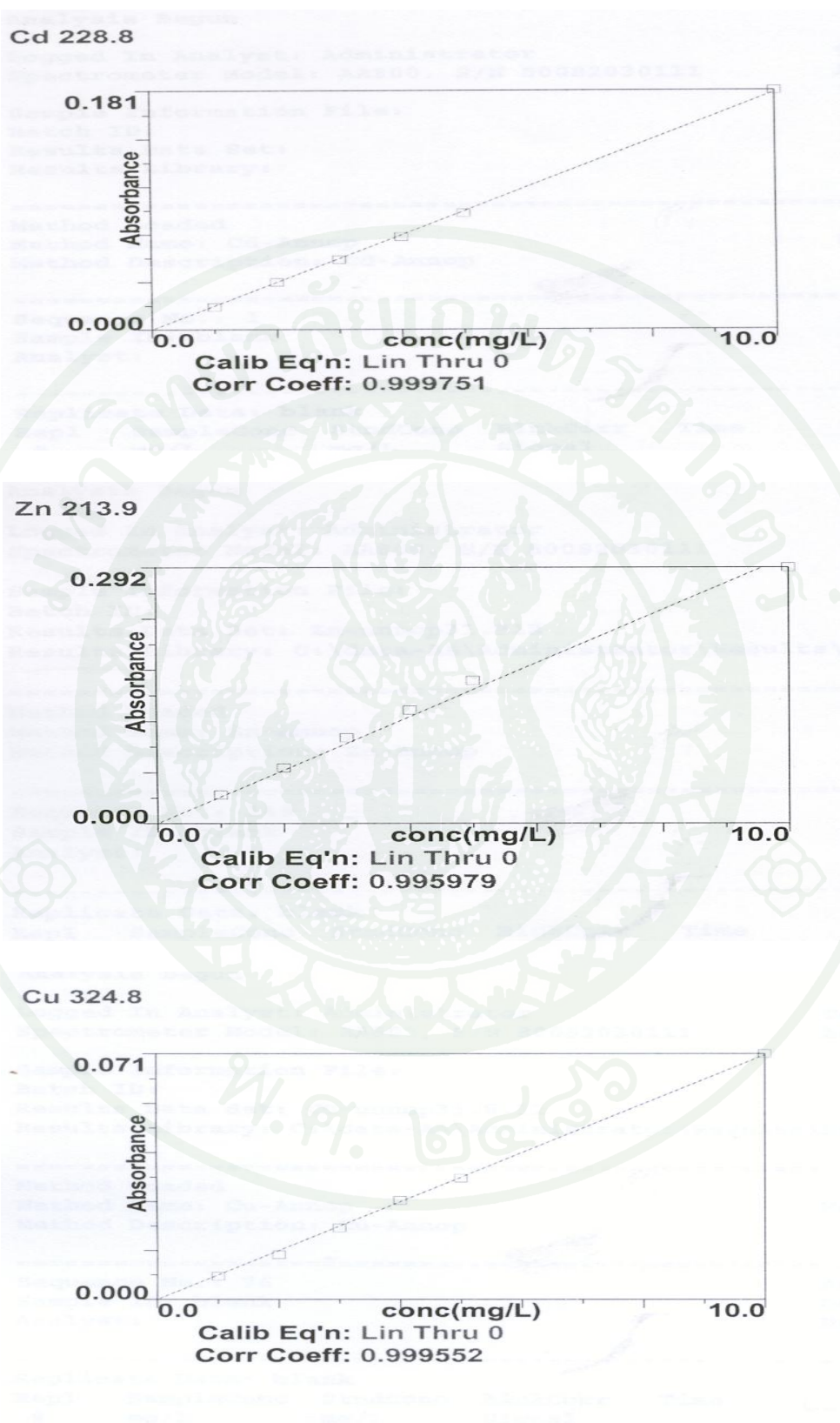
เวลา (ชม.)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ	ปริมาณ ที่เหลือ	ประสิทธิ ภาพ
0	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.07	99.84	0.08	99.82	0.06	99.87	0.07	99.84
4	0.18	99.60	0.20	99.56	0.17	99.63	0.18	99.60
5	0.32	99.29	0.36	99.20	0.45	99.00	0.38	99.16
6	0.84	98.13	0.89	98.02	0.82	98.18	0.85	98.11
7	1.43	96.82	1.54	96.58	1.53	96.60	1.50	96.67
8	2.75	93.89	2.83	93.71	2.64	94.13	2.74	93.91
9	3.64	91.91	3.84	91.47	3.62	91.96	3.70	91.78
10	5.98	86.71	6.02	86.62	5.84	87.02	5.95	86.79
11	9.03	79.93	9.23	79.49	9.23	79.49	9.16	79.64
12	14.23	68.38	14.54	67.69	14.33	68.16	14.37	68.07
13	20.58	54.27	21.23	52.82	21.06	53.20	20.96	53.43
14	33.23	26.16	33.45	25.67	32.45	27.89	33.04	26.57
15	38.65	14.11	39.42	12.40	39.04	13.24	39.04	13.25
16	44.97	0.07	44.99	0.02	45.02	-0.04	44.99	0.01
17	44.97	0.07	44.99	0.02	45.02	-0.04	44.99	0.01
18	44.97	0.07	44.99	0.02	44.98	0.04	44.98	0.04
19	44.98	0.04	45.00	0.00	44.98	0.04	44.99	0.03
20	44.98	0.04	45.00	0.00	45.00	0.00	44.99	0.01
21	44.98	0.04	45.00	0.00	45.00	0.00	44.99	0.01
22	44.98	0.04	45.00	0.00	45.00	0.00	44.99	0.01
23	44.98	0.04	45.00	0.00	45.00	0.00	44.99	0.01
24	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00

ตารางผนวกที่ 19 ข้อมูลผลการดูคั้งบองแดงผ่านคอลัมน์โดยน้ำเสี่ยจากโรงงาน

เวลา (ชม.)	คั้งที่ 1		คั้งที่ 2		คั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	ปริมาณ ที่เหลี่ย	ประสิทธิ์ ธิภาพ	ปริมาณ ที่เหลี่ย	ประสิทธิ์ ธิภาพ	ปริมาณ ที่เหลี่ย	ประสิทธิ์ ธิภาพ	ปริมาณ ที่เหลี่ย	ประสิทธิ์ ธิภาพ
0	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
4	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
5	0.05	99.88	0.06	99.86	0.04	99.91	0.05	99.88
6	0.13	99.70	0.15	99.65	0.11	99.75	0.13	99.70
7	0.35	99.19	0.48	98.89	0.32	99.26	0.38	99.11
8	0.71	98.36	0.74	98.29	0.69	98.40	0.71	98.35
9	1.13	97.39	1.54	96.44	1.02	97.64	1.23	97.16
10	1.64	96.21	1.61	96.28	1.56	96.39	1.60	96.29
11	3.78	91.26	3.89	91.01	3.42	92.09	3.70	91.45
12	5.68	86.87	5.78	86.64	5.61	87.03	5.69	86.84
13	8.21	81.02	8.95	79.31	8.22	80.99	8.46	80.44
14	13.65	68.44	14.23	67.10	13.26	69.34	13.71	68.29
15	23.45	45.78	24.12	44.23	22.64	47.65	23.40	45.89
16	34.21	20.90	35.16	18.71	34.22	20.88	34.53	20.16
17	38.75	10.40	38.41	11.19	38.56	10.84	38.57	10.81
18	43.24	0.02	43.23	0.05	43.25	0.00	43.24	0.02
19	43.24	0.02	43.23	0.05	43.25	0.00	43.24	0.02
20	43.24	0.02	43.23	0.05	43.25	0.00	43.24	0.02
21	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00
22	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00
23	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00
24	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00	43.25	0.00



ภาพผนวกที่ 1 การทดลองผ่านคอลัมน์กระดาษ



ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม สังกะสี และทองแดง

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นางสาวอนิสา ทรัพย์นิวัตต์

เกิดวันที่ 10 กรกฎาคม 2530

สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์ทั่วไป) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ส.บ. (อาชีวอนามัยและความปลอดภัย) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยนักวิจัย

สถานที่ทำงานปัจจุบัน ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -