



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

.....
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

Efficiency Removal of Heavy Metal in Synthetic Wastewater by Fly Ash and Bottom Ash

นามผู้วิจัย นางสาวราตี วีระศิลป์ชัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาติ เขียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ **เดือน** **พ.ศ.**

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

Efficiency Removal of Heavy Metal in Synthetic Wastewater by Fly Ash and Bottom Ash

โดย

นางสาวราลี วีระศิลป์ชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วราลี วีระศิลป์ชัย 2555: ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้
ถ้ำลอยและถ้ำกันเตา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: รองศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, M.Eng. 85 หน้า

การทดลองกระบวนการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนัก 3 ชนิดคือ
แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), อาร์เซนิก (As) ที่ความเข้มข้น 5 มก./ล. โดยใช้ถ้ำลอยและถ้ำกันเตา
เป็นวัสดุดูดซับ โดยใช้คอลัมน์พลาสติกทรงกระบอกปริมาตร 4.3×10^{-3} ม.³ ใส่ชั้นกรองที่ทำการ
บดอัดถ้ำลอยและถ้ำกันเตาอัตราส่วนผสมที่ 80:20 ของน้ำหนัก เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของ
ถ้ำลอยและถ้ำกันเตาในการกำจัดโลหะหนัก ทำการทดลองโดยให้น้ำเสียไหลตามแรงโน้มถ่วง
ลงผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุดูดซับความสูง 60 ซม. โดยใช้อัตราน้ำล้นผิว 0.4, 0.5 และ 0.6
ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพในการดูดซับ
แคดเมียม ตะกั่ว และอาร์เซนิก มีค่า 43.25 - 99.80% 88.32 - 99.80% และ 88.99 - 99.81%
ตามลำดับ ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว
และอาร์เซนิก มีค่า 30.05 - 99.80% 45.39 - 99.81% และ 44.40 - 99.81% ตามลำดับ ที่อัตราน้ำ
ล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว และอาร์เซนิก มีค่า
21.35 - 99.80% 31.37 - 99.80% และ 37.49 - 99.81% ตามลำดับ

Waralee Weerasilapachai 2012: Efficiency Removal of Heavy Metal in Synthetic Wastewater by Fly Ash and Bottom Ash. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Suthep Siri Wittayapakorn, M.Eng 85 pages.

Heavy metal absorption experiment in synthesis wastewater had been conducted 5 mg/l of Cd, Pb and As respectively by fly ash and bottom ash application as the absorbed materials. The $4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ cylinder plastic column provided the filter with fly ash and bottom ash mashed with ratio 80:20 by weight. The gravity wastewater to the column with 60 cm of height of absorbed materials were rate of surface water 0.4 0.5 and 0.6 cu.m./sq.m.-hr. respectively.

At the rate 0.4 cu.m./sq.m.-hr., the efficiency in the absorption Cd, Pb and As were 43.25 - 99.80% 88.32 - 99.80% and 88.99 - 99.81% respectively. The rate 0.5 cu.m./sq.m.-hr., the efficiency in the absorption Cd, Pb and As were 30.05 - 99.80% 45.39 - 99.81% and 44.40 - 99.81% respectively. The rate 0.6 cu.m./sq.m.-hr., the efficiency in the absorption Cd, Pb and As were 21.35 - 99.80% 31.37 - 99.80% and 37.49 - 99.81% respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และรองศาสตราจารย์ ประทีป ดวงเดือน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้และคำปรึกษาเพื่อให้เกิดแนวความคิดและความเข้าใจในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดจนคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ ขอขอบพระคุณคุณหทัย ลิ่มเจริญ และบริษัท BLC POWER จำกัดที่เอื้อเฟื้อวัสดุและทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัยและทดสอบผลวิจัย รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานต่าง ๆ ด้วยดี ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย น้องสาว คุณยายและญาติๆ ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี

วราลี วีระศิลป์ชัย

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	70
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (1995)	25
2	แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับด้วยเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา	31
3	แสดงพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์	31
4	แผนดำเนินการในงานวิจัย	33
5	ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	35
6	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	38
7	ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	41
8	ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	44
9	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	47
10	ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	50
11	ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	54
12	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	57
13	ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	60

ตารางผนวกที่

1	ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	71
2	ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	71
3	ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	72
4	ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	72
5	ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
6 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	73
7 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	74
8 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	74
9 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	75
10 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	75
11 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	76
12 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	76
13 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	77
14 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	77
15 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	78
16 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	78
17 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	79
18 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
19 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	80
20 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	80
21 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	81
22 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	81
23 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	82
24 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	82
25 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 1	83
26 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 2	83
27 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลอง ครั้งที่ 3	84

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นที่ผิวของของแข็ง	16
2	แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับ	18
3	แสดงแบบการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง	29
4	แสดงขั้นตอนการวิจัย	32
5	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	36
6	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	36
7	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	37
8	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	39
9	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	39
10	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	40
11	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	42
12	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	42
13	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	43
14	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	43
16	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	46
17	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	46
18	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	48
19	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	49
20	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	49
21	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	51
22	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	52
23	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	52
24	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	53
25	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	55
26	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	55
27	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	56
28	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	58
30	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	59
31	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	61
32	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	61
33	แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	62
34	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ชม.	=	ชั่วโมง
ชม.	=	เซนติเมตร
ม. ³	=	ลูกบาศก์เมตร
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.	=	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
⁰ C	=	องศาเซลเซียส
N.D.	=	Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit

ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

Efficiency Removal of Heavy Metal in Synthetic Wastewater by Fly Ash and Bottom Ash

คำนำ

กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายวิธีได้แก่ การตกตะกอน กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน หรือการดูดซับผิวดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งโรงงานได้ผลเป็นอย่างดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูง ดังนั้นหากสามารถหาวิธีบำบัดโลหะหนักของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีอื่น ที่สามารถบำบัดหรือมีส่วนช่วยในบำบัดเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการบำบัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสามารถนำของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์ในการบำบัด จะเป็นการช่วยลดของเสียที่จะเกิดขึ้นใหม่และสารเคมีที่จะใช้ในการบำบัดอีกด้วย

ในประเทศไทยมีโรงงานไฟฟ้าพลังงานถ่านหินอยู่หลายแห่ง วัสดุเหลือใช้ส่วนใหญ่ที่เหลือจากโรงงานไฟฟ้า คือ เถ้าก้นเตา (bottom ash) และเถ้าลอย (fly ash) โดยวัสดุเหลือใช้ทั้ง 2 ชนิดอาจมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียได้ และจากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา วัสดุเหลือใช้ทั้ง 2 ชนิด ไม่พบว่ามีสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายหรือเป็นพิษ จึงเหมาะที่จะนำมาทดลองเพื่อแก้ไขปัญหา น้ำเสีย อีกทั้งยังเป็นวิธีการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ดีขึ้น

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนผสมที่ 80:20 โดยน้ำหนัก มาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม ตะกั่ว และอาร์เซนิก ซึ่งหากประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักสูงพอที่จะนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงได้ จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตสารดูดซับมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ้ำกันเตาและถ้ำลอย
2. เพื่อศึกษาอัตราการกรองที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยถังปฏิกริยาระดับถังปฏิบัติการ (lab scale)
2. ใช้ถ้ำกันเตาและถ้ำลอย จากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง ในการทดลอง โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ 80:20 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุดูดซับ
3. ในการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะหนัก ดังนี้ แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), อาร์เซนิก (As) โดยความเข้มข้นที่ใช้คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

การตรวจเอกสาร

โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึงโลหะหนักที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมีค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก โครเมียม เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกัน (Dean *et al.*, 1972) โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็งยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว คุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหารและเมื่อโลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต (จักรพงษ์, 2548) ซึ่งผลของความเป็นพิษของโลหะหนักต่อกลไกระดับเซลล์มี 5 แบบคือ

1. ทำให้เซลล์ตาย
2. เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์
3. เป็นตัวการทำให้เกิดมะเร็ง
4. เป็นตัวการทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม
5. ทำความเสียหายต่อโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยทางพันธุกรรม

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะหนักต่างๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 4 ประเภทดังนี้คือ

1. โลหะหนักที่ให้คุณประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
2. โลหะที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อะลูมิเนียม
3. โลหะหนักที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น ปรอท ตะกั่ว และสารหนู

4. โลหะที่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อยแต่ให้โทษถ้าได้รับในปริมาณมาก และทับถมที่พื้นเบื้องล่างเกิดการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้น้ำเน่าเหม็นในที่สุด (ปราณี, 2548)

แคดเมียม (Cadmium)

1. ลักษณะโดยทั่วไป

แคดเมียมเป็นธาตุในกลุ่มโลหะทรานซิชัน จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับสังกะสีในตารางธาตุ สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cd ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

เลขอะตอม	48
น้ำหนักอะตอม	112.40
ความหนาแน่น	8.65 ที่ 20 °C
จุดหลอมเหลว	321 °C
จุดเดือด	765 °C
covalent radii	1.48 x 10 ⁻¹⁰ m

แคดเมียมเป็นโลหะอ่อนสีเงิน สามารถตัดและตีแผ่ได้ ละลายได้ในกรดทุกชนิดและละลายได้ดีในสารละลายเข้มข้นแอมโมเนียมไนเตรท แคดเมียมไอออนไม่มีสีและมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +2 (Parker, 1993) ในธรรมชาติจะพบแคดเมียมในรูปสินแร่ กรีนนอคไคท์ (CdS) และโอตาไวท์ (CdCO₃) โดยส่วนใหญ่แล้วมักพบปะปนอยู่กับสินแร่โลหะซัลไฟด์อื่นๆ เช่น ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง เมื่อเข้าสู่กระบวนการถลุงแร่แล้วจะได้สินแร่แคดเมียมซัลไฟด์ เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Smith, 1995) โดยเฉพาะสินแร่สังกะสี เช่น shalerite (ZnS) หรือ calamine (ZnCO₃) จะพบแคดเมียมปะปนอยู่ประมาณร้อยละ 0.3 – 0.1 อาจมากถึง ร้อยละ 3 (Fassett, 1998)

แคดเมียมในธรรมชาติเป็นสารเจือปนในแร่สังกะสี เช่น แร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite, ZnS) หรือ คาลาไมน์ (calamine, ZnCO₃) มักจะพบแคดเมียมร่วมกับสังกะสีเสมอในอัตราส่วน Zn/Cd ประมาณ 1:350 จนถึง 1:1000 แคดเมียมส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการถลุงสังกะสี และบางส่วนได้จากอุตสาหกรรมถลุงทองแดงและตะกั่ว IARC (International Agency for Research an Cancer) รายงานปริมาณการผลิตแคดเมียมทั่วโลก ในปี ค.ศ. 1973 มีปริมาณ 17,000

ต้น และประเทศที่ผลิตได้แก่ แคนาดา ญี่ปุ่น อเมริกา สหภาพโซเวียต ฝรั่งเศส อิตาลี สเปน ยูโกสลาเวีย เป็นต้น สำหรับประเทศไทยเริ่มทำการผลิตแคดเมียมตั้งแต่ปี 2533 โดยได้แคดเมียมจากกระบวนการผลิตของโรงงานถลุงสังกะสี จังหวัดตาก

2. การนำมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและการเกษตร ในด้านอุตสาหกรรมแคดเมียมและเกลือของแคดเมียมจำนวนมากมักถูกนำ มาใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาผสมกับโลหะอื่น เพื่อเพิ่มความเหนียวและทนต่อการสึกกร่อน เช่น อลูมิเนียม โปรท แมกนีเซียม นิกเกิล อัลลอยด์(alloy) ซึ่งนำไปทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่ออ เครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอม ส่วนประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้ทำเป็นแบตเตอรี่ นิกเกิล-แคดเมียม ผสมในยางเพื่อให้ทนความร้อน ทำหน้าที่เป็น stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีทาบ้าน สีชุบโลหะ หมึกพิมพ์ สีทำ แก้ว กระจก สิ่งทอ เป็นต้น ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ สำหรับอุปกรณ์เซลล์สุริยะ (solar cell) และใช้ในงานทางการแพทย์ และทันตแพทย์ ด้านการเกษตรแคดเมียมถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา ส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต (Dunnick and Fowler, 1988)

3. การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

แคดเมียมสามารถแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจากแหล่งกำเนิดจากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสีได้แก่ การทำเหมือง การหลอมและถลุง โรงงานชุบโลหะแคดเมียม โรงงานเหล็กและเหล็กกล้า โดยอุตสาหกรรมเหล่านี้จะปล่อย ฝุ่น ไอน้ำเสีย และกากตะกอนที่มีแคดเมียมปนอยู่ ออกมา น้ำเสียจากโรงชุบโลหะแคดเมียม จะมีแคดเมียมปนมาประมาณ 100-500 ppm และมีโลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่น กากตะกอนของน้ำทิ้งจากโรงงานกำจัดน้ำเสียจะมีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย 15.6 ppm และการใช้กากตะกอนเหล่านี้เป็นปุ๋ยจะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตซึ่งมีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบแคดเมียมฟอสเฟตละลายน้ำได้น้อยจึงสะสมอยู่ในดิน จากการใช้อ่านหินและน้ำมันเตา แคดเมียมจะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของไอและเถ้า ปริมาณแคดเมียมในถ่านหินมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-5 ppm พบว่าในเถ้าของถ่านหินมีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 ppm ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยในน้ำเตา ประมาณ 0.3 ppm นอกจากนี้การสึกกร่อนของสังกะสี และยางรถยนต์ซึ่งมีแคดเมียมเป็นสิ่งเจือปนอยู่ เมื่อโลหะ

หรือภาวะที่ซึบสั้กจะสั้กเกิดการสั้กกร่อน แคลเมียมจะแพร่กระจายสู่สั้กแวดลอมได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

4. ความเป็นพิษ

สั้กมีชีวิตเกือบทุกชนิดมีโอกาสที่จะเกิดการสะสมแคลเมียม เนื่องจากแคลเมียมมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับสั้กจะสั้ก ทำให้แคลเมียมสามารถเข้าไปแทนที่สั้กจะสั้กในเอนไซม์บางชนิด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเมตาบอลิซึมในร่างกาย แคลเมียมเป็นธาตุที่ไม่จำเป็นต่อร่างกาย แต่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายและสั้กแวดลอมแคลเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ และทางการรับประทานอาหาร การดูดซึมแคลเมียมในร่างกายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสั้กจะสั้ก ถ้ามีปริมาณสั้กจะสั้กในร่างกาย 0.125 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งน้ำหนักตัว ร่างกายสามารถดูดซึมแคลเมียมได้ 79-85 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่รับเข้าไป แต่ถ้าความเข้มข้นของสั้กจะสั้กในร่างกายเท่ากับ 1.0 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว ร่างกายจะดูดซึมแคลเมียมได้ 43-84 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่รับเข้าไป (Lee, 1983)

แคลเมียมจะแสดงความเป็นพิษทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรังต่อมนุษย์ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันได้แก่ พิษต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อได้รับแคลเมียมโดยการรับประทานจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว น้ำลายฟูมปาก ในรายที่เป็นมากอาจระบบการทำงานของไตล้มเหลว และอาจมีผลไปทำลายตับด้วย อาจทำให้เกิดพิษต่อระบบหายใจ หากสูดไอแคลเมียมเข้าไป ทำให้เกิดการระคายเคืองของหลอดลมและปอด ไอ ปวดศีรษะ ส่วนความเป็นพิษแบบเรื้อรังเกิดเมื่อร่างกายได้รับแคลเมียมในปริมาณไม่มากเป็นเวลานานติดต่อกัน ความเป็นพิษจะปรากฏที่ปอดและไตเป็นส่วนใหญ่ ทำให้เกิดอาการบวมหรือฟองของเนื้อเยื่อปอด เกิดอาการหายใจขัด ส่วนความเป็นพิษที่ไต จากรายงานการเกิดโรค อีไต-อีไต ในประเทศญี่ปุ่น พบความเป็นพิษที่ไตก่อนที่ปอด โดยเกิดแผลที่ไต ทำให้ไตขับปัสสาวะที่มีโปรตีนมากกว่าปกติ ในหญิงอายุ 50 ปีขึ้นไปพบโรคกระดูกผุและพรุน งอโค้งได้ ทำให้กระดูกเสียรูปทรงและหักได้ เป็นต้น (สุกมาศ, 2539) มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวงกำหนดให้มีแคลเมียมเจือปนได้ไม่เกิน 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร (การประปานครหลวง, 2549) และมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินจะมีแคลเมียมปนเปื้อนได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

ตะกั่ว (Lead)

1. ลักษณะทั่วไป

ตะกั่วเป็นโลหะที่มีอยู่ในธรรมชาติมีสีเงินปนเทา จัดอยู่ในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 207.19 ค่าความถ่วงจำเพาะ 11.35 จุดหลอมเหลวและจุดเดือด 327°C และ $1,725^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นสารที่นำมาทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย จึงง่ายต่อการหลอม และมีคุณสมบัติที่อ่อน ทนต่อการผุกร่อนได้ดี สามารถดัดแปลงให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ตามต้องการ กลายเป็นไอได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ ตะกั่วมีเลขออกซิเดชัน ได้หลายค่า คือ +1, +2 และ +4 แต่ตะกั่วส่วนมากจะอยู่ในสถานะ +2 ซึ่งอยู่ในรูปที่เสถียรที่สุด (สมลักษณ์, 2543)

2. การนำมาใช้ประโยชน์

ตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในปัจจุบันมีการประมาณว่าในปีหนึ่งๆ มนุษย์นำตะกั่วมาใช้ประมาณ 3 ล้านตัน โดยการนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์ใน 2 รูป คือในรูปของโลหะ (metallic form) เช่น ทำขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ ทำสายเคเบิล ฉนวนกันมันตรังสี และในรูปสารประกอบเคมีในอุตสาหกรรมพลาสติกและแก้ว ใช้ทำเม็ดสี เช่น ตะกั่วขาว (ZPbCO_3 , Pb(OH)_2) ตะกั่วแดง (Pb_3O_4 , CaPbO_4 , PbCrO_4) ซึ่งเม็ดสีเหล่านี้หากใช้ทำของเล่นเด็กหรือดินสอจะเป็นอันตรายต่อเด็กมาก ตะกั่วในน้ำมันเบนซินเป็นแหล่งใหญ่ที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วยของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม (Chow, 1970) ตะกั่วเตตราเอทิล และเตตราเมทิลใช้ผสมในน้ำมัน เพื่อเพิ่มค่าออกเทน (octane) ในน้ำมัน เมื่อเกิดการเผาไหม้ตะกั่วก็จะถูกปลดปล่อยออกมากับไอเสีย ในทางเกษตรกรรม ตะกั่วจะปะปนอยู่ในปุ๋ยและสารเคมีที่ใช้ในการเพิ่มผลผลิต และปรายศัตรูพืชที่สำคัญได้แก่ ปุ๋ยฟอสเฟต และเลคอะซิเนต ซึ่งจะมีตะกั่วปะปนอยู่ในปริมาณที่สูง เมื่อถูกนำมาใช้จะทำให้มีตะกั่วตกค้างอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก (สมลักษณ์, 2543)

3. การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วเป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติ เมื่อมีการนำตะกั่วผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีตะกั่วเจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อมมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และแพร่กระจายจากโรงงานอุตสาหกรรม ตะกั่วที่เป็นสารมลพิษจากควันโรงงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปแร่ตะกั่ว เช่น PbS , PbO , PbSO_4 ทำให้ตะกั่วในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น ต่อมาจะเกาะกับอนุภาคในบรรยากาศตกลงมาเป็นฝนฝุ่น หรือรวมตัวกับ

ความชื้นในบรรยากาศตกลงมาเป็นน้ำฝนสะสมอยู่ตามพื้นดินและแหล่งน้ำ จากนั้นจึงเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารต่อไป (สุคนธ์, 2523) โดยทั่วไปจะพบตะกั่วได้ทั้งใน อากาศ น้ำ และดิน

4. ความเป็นพิษ

เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะไปขัดขวางการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ปริมาณตะกั่วจะมีผลต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก ตะกั่วสามารถถ่ายทอดผ่านทารกในครรภ์มารดาเข้าสู่ทารกในครรภ์ได้โดยปกติร่างกายของคนจะสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณจำกัด ในคนปกติจะมีตะกั่วในเลือดประมาณ 0.25 ppm โดยไม่เกิดอาการเป็นพิษ แต่ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูงในทันที จะเกิดเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน เช่นเกิดอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อุจจาระสีดำ ช็อก ตื่นเต้นง่าย ความจำเสื่อมและเป็นอันตรายต่อไต นอกจากตะกั่วจะมีผลกระทบโดยตรงต่อร่างกาย ยังให้ผลกระทบต่อร่างกายโดยอ้อมได้ เช่น ความต้านทานต่อโรคหลายชนิดลดลง เป็นต้น (พิมลและชัยวัฒน์, 2525) มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวงกำหนดให้มีตะกั่วเจือปนได้ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (การประปานครหลวง, 2549) และมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินจะมีตะกั่วปนเปื้อนได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

สารหนู (Arsenic)

1. ลักษณะทั่วไป

สารหนูมีคุณสมบัติทั้งโลหะและอโลหะ เป็นธาตุอยู่ในหมู่ 5 ของตารางธาตุ ใช้สัญลักษณ์ As มีเลขอะตอม 33 น้ำหนักอะตอม 74.9216 สามารถแสดงค่าวาเลนซ์ได้หลายค่าคือ +3 +5 และ -3 สารหนูที่พบในธรรมชาติมักพบเจือปนอยู่ในรูปของสารประกอบอาร์เซไนต์ หรือซัลไฟด์ของทองแดง ตะกั่วเงิน และทอง ไม่พบในรูปของโลหะ โดยส่วนใหญ่พบในรูปของแร่อาร์ซีโนไฟไรต์ (FeAsS) รีอัลการ์ (tetraarsenic tetrasulfide, As_4S_4) และออร์พิมิน (arsenic trisulfide, As_2S_3) หรืออาจพบในรูปออกไซด์ สำหรับในน้ำมักพบในรูปอาร์เซเนต (arsenate) หรืออาร์เซไนต์ (arsenite)

2. การนำมาใช้ประโยชน์

มีการนำสารหนูมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านเกษตรกรรม คือ ใช้เป็นสารกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (superphosphate) ซึ่งในปุ๋ยจะมีสารหนูประกอบอยู่ประมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้ฆ่าแมลงที่สำคัญคือ ตะกั่วอาร์เซนิต และยารักษาโรค ในสมัยพุทธกาลได้นำสารประกอบของสารหนูมาเป็นองค์ประกอบของยารักษาโรค สารหนูสามารถใช้รักษาโรคซิฟิลิส การใช้สารหนูเป็นองค์ประกอบของยารักษาโรคซิฟิลิสยังคงดำเนินต่อมา สารหนูแดงและสารหนูเหลืองซึ่งเป็นซัลไฟด์ใช้ทำสารสีเมื่อต้องการสีแดงและสีเหลือง สารหนูยังใช้ในการทำทองบรอนซ์และทำดอกไม้ไฟ นอกจากนี้ ในการทำแบตเตอรี่สะสมไฟฟ้า ถ้าผสมสารหนูเล็กน้อยในตะกั่วและพลวงจะทำให้ได้โลหะผสมที่มีคุณภาพดีขึ้น

3. การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

จากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชและปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต ซึ่งมีสารหนูประกอบอยู่ ทำให้เกิดการปนเปื้อนในดิน โดยเฉพาะดินบริเวณที่มีการใช้ตะกั่วอาร์เซนิตมาก สารหนูที่พบเป็นสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน มีปริมาณตั้งแต่ 21-16,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Visootviseth, 2002) สารหนูบางส่วนจะถูกพืชดูดซับเข้าไปบางส่วนปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน และการปนเปื้อนจากทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การเผาถ่านหิน โรงงานถลุงโลหะต่างๆ ทำให้มีการปนเปื้อนในน้ำและในบรรยากาศ

4. ความเป็นพิษ

สารหนูพบได้ในอากาศ, ในดิน, น้ำ และอาหาร ปริมาณที่จะพบในอากาศอยู่ในช่วง 0.4-30 ng/m³ ปริมาณที่พบในน้ำตามธรรมชาติ 1-2 mg/l (ยกเว้นบางกรณี) ในอาหาร โดยเฉพาะอาหารทะเลเป็นแหล่งที่สารหนูจะมีอยู่มาก แต่สารหนูในอาหารทะเลเป็นสารหนูอินทรีย์ ซึ่งมีความเป็นพิษไม่มาก มีการประมาณว่าสารหนูในอาหารจะมีอยู่ในรูปสารหนูอินทรีย์ 75% และ ในรูปของสารหนูอนินทรีย์ 25% คนได้รับสารหนูโดยการสูดดม การกิน การดูดซึมผ่านผิวหนังและเยื่อ โดยส่วนใหญ่เป็นการได้รับจากการกินและการสูดดม ปกติคนเราในแต่ละวันได้รับสารหนู ปริมาณ 0.04-1.4 mg ปริมาณสารหนูที่คนกินแล้วเป็นพิษ ถึงขั้นเสียชีวิตอยู่ในช่วง 1.5 mg/ น้ำหนักตัว 1 kg (arsenic trioxide) ถึง 500 mg/ น้ำหนักตัว 1 kg (diethyl arsenic acid) โดยจะเกิดอาการพิษเฉียบพลันคือ อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของ

หัวใจ และเสียชีวิตจากการทำงานล้มเหลวของหัวใจ ถ้าได้รับสารหนูในระดับเกินค่ามาตรฐาน (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) อาจเกิดการเป็นพิษสารหนูเรื้อรัง ได้แก่ ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค (จุดสีน้ำตาลดำกระดำกระด่าง, จุดขาว ๆ กระจุกกระจาย, ผิวดำ/เทา ตามฝ่ามือฝ่าเท้า) พื้นที่ตามฝ่ามือฝ่าเท้า มีปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด ระบบอื่น ๆ (บางรายงาน) รวมทั้งมะเร็งอวัยวะภายในบางกรณี มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวงกำหนดให้มีอาร์เซนิกเจือปนได้ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร การประปานครหลวง, 2549) และมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินจะมีอาร์เซนิกปนเปื้อนได้ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

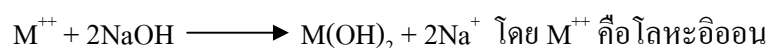
กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

1. การตกตะกอนผลึกทางเคมี (chemical precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธี คือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (sulfide precipitation)

2. การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมี คือปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาตามสมการนี้



การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชกว้างโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถจะละลายกลับมาได้อีก ถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

3. การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ มักจะใช้สารเคมีในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ คือ การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มีมากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยนำซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

4. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกเรียกว่า แคตไอออนเอกเชนเจอร์ (cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (anion exchanger) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสียกล่าวคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซินเพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

5. ออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation and reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้มากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II) ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีออกซิเดชันได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ สารเคมีที่ใช้คือคลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชันคือการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกละลายปนอยู่ การบำบัดใช้ไอออน (II) ซัลเฟตไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนขาวลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้ได้ค่าพอเหมาะ ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ถ้ามีการใช้ปูนขาวมากเกินไปค่าพีเอชจะเป็นค่าสูง ต้องใช้กรดปรับค่าพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้งไป การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่ต้องการกำจัดก่อนหรือหลังการบำบัดจะเป็นการช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการบำบัดหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นสมบูรณ์เพียงใด

6. รีเวิร์ส ออสโมซิส (reverse osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมิด ซึ่งจะให้น้ำเฉพาะตัวทำละลายผ่าน semi permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขึ้นดันโดยการปรับค่าพีเอชแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรนวิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ ส่วนระบบการบำบัดที่คล้ายกับรีเวิร์สออสโมซิสคือ ระบบอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) โดยสองระบบนี้มีข้อแตกต่างกันคือระบบรีเวิร์สออสโมซิส จะใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แรงดันสูง ส่วนอัลตราฟิลเตรชันใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่แรงดันต่ำ

7. การระเหย (evaporation)

วิธีการระเหยน้ำออกนี้เป็นวิธีง่ายๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

8. อิเล็กโทรไดอะไลซิส (electro dialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรนวิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

9. การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (electrolytic recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

10. การดูดติดผิว (adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 Å ถึง 20,000 Å กระบวนการนี้สามารถนำ มาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมรับได้ในน้ำดื่ม

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว

การดูดติดผิวมี 2 วิธีคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorptions) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดูดติดผิวทางกายภาพที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความแตกต่างของพลังงานและ/หรือแรงดูดติดผิวทางไฟฟ้า (แรงวานเดอร์วาลส์) ซึ่งมีความน้อย โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (multilayer) ซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่ชั้นโมเลกุลก่อนหน้านั้น โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลสารถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดติดแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดติดผิวมีพลังงานต่ำการย้อนกลับของกระบวนการดูดติดผิวทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดติดผิวระหว่างสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิว ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกดูดติดผิวสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสารดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดติดผิวแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้เอง เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวสารของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ มากกว่าอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารที่มีอำนาจดูด โมเลกุลต่างๆ มาดูดติดผิวได้มีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอ็ดติเวด-เต็ดซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50–200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ จับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดติดผิวที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

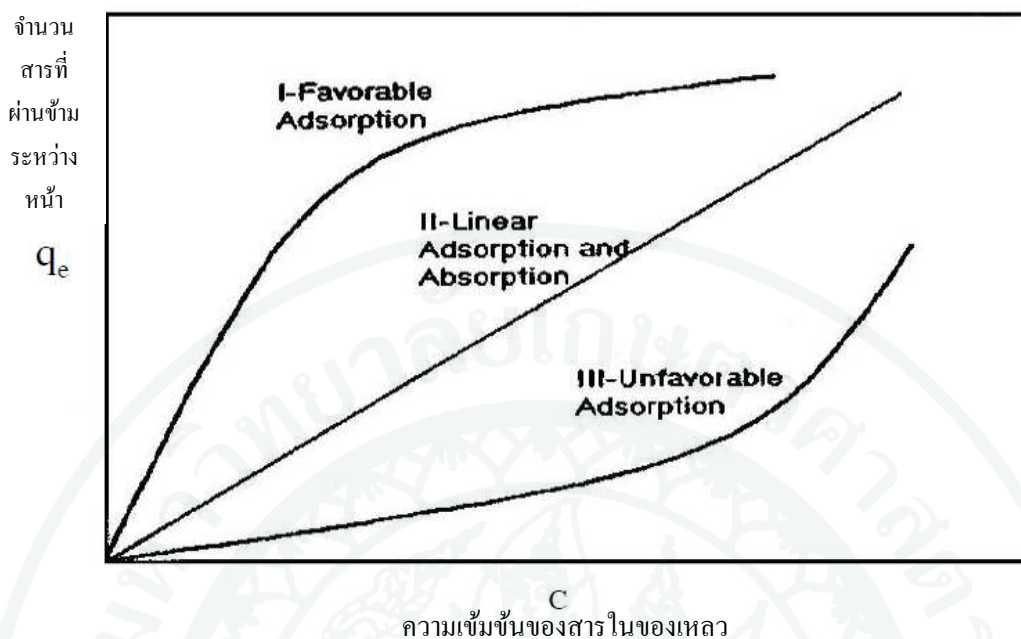
3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

ปัจจุบันสารดูดซับสังเคราะห์ได้ถูกผลิตขึ้นมาหลากหลายชนิดเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งๆ ที่ความคล่องตัวในการใช้และความสามารถในการดูดซับมีน้อยกว่า activated carbon แต่สารดูดซับเหล่านี้ก็เหมาะสำหรับการใช้งานบางอย่างเท่านั้น (สุวิชา, 2546)

การดูดซับ (Adsorption)

1. การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ (adsorption) ถูกพบครั้งแรกโดย Scheele เมื่อปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดซับของก๊าซ ต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดซับของสารละลายเป็นครั้งแรก เป็นที่ทราบกันดีว่า การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพชีวภาพ และเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างหน้า (interface) โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของ 2 ภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) ภาพที่ 1 แสดงการกระจายโมเลกุลของของเหลวบนพื้นที่ผิวของของแข็ง โดยที่ C บนแกนอน หมายถึง ความเข้มข้นของสารในของเหลวที่สัมผัสกับของแข็งบริเวณระหว่างหน้าของของเหลวกับของแข็งและ q_c บนแกนตั้งหมายถึง จำนวนของสารที่ผ่านข้ามระหว่างหน้า (ปานใจ, 2545)



ภาพที่ 1 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นที่ผิวของของแข็ง

ที่มา : Weber (1972)

จากภาพที่ 1 เส้นโค้ง I และ III แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของแข็งกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว ซึ่งเส้นโค้ง 2 เส้นนี้แสดงถึงรูปแบบการดูดซับที่ดี (favorable) และไม่ดี (unfavorable) ตามลำดับ สำหรับเส้นโค้ง II นั้นแสดงรูปแบบการดูดซับแบบเส้นตรง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของแข็งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว

การดูดซับสามารถนำมาใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและสารเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดซับกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Tchobanoglous *et al.*, 1991)

2. กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (binding force) หลายชนิด ระหว่างโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์และพื้นที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งกำเนิดจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) การดูดซับที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบคือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorptions) การดูดซับทั้ง 2 แบบ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง เนื่องมาจากแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของของแข็งมีค่าสูงกว่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลว (อิรัชย์, 2539)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) (Eckenfelder, 1981) โมเลกุลของสารถูกดูดซับแบบหลายชั้น (multilayered) แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารดูดซับ กล่าวคือ จำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (Cheremisinoff and Elierbusch, 1978) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญอันได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (orientation) การกระจายตัว (dispersion) และการเหนี่ยวนำ (induction) ซึ่งการดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลมีขั้วนั้น ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งจะดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้น การดูดซับจะเกิดแบบการกระจายตัวหรือเกิดการสั่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสของอะตอมทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการเพิ่มความเสถียรแก่ระบบ ทำให้โมเลกุลสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น ซึ่งการดูดซับทางเคมีแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้ (reversible) โดยจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ กล่าวคือ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะส่งผลให้เกิดการคายสารออก (desorption) ขึ้น (Cheremisinoff and Elierbusch, 1978)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น โดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

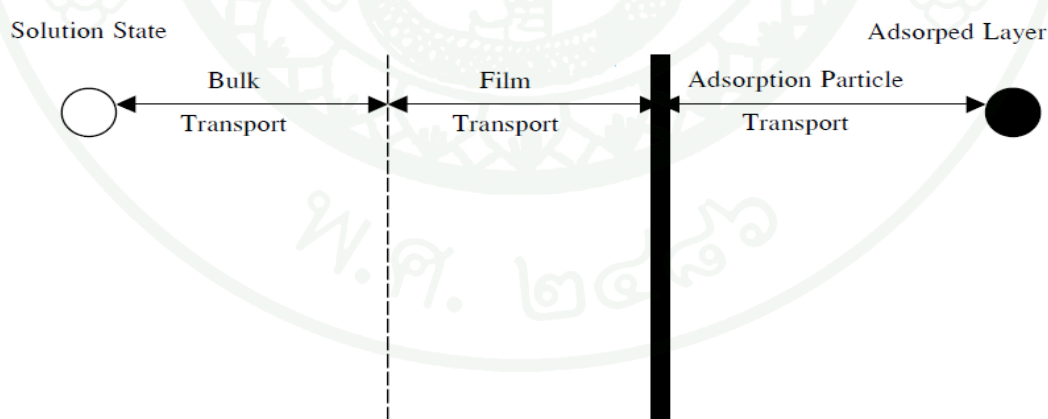
จะเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับดังกล่าว ต่อไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการดูดซับของสารถูกดูดซับ โดยสารดูดซับที่มีรูพรุน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2

1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของสารที่ถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับอยู่

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

โดยปกติการขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ (อริชัย, 2539)



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับ

ที่มา : Eckenfelder (1981)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ในระหว่างที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะยึดเกาะอยู่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก โดยทั่วไปปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่

3.1 ความดันป้อน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) หรือแพร่ผ่านรูพรุน (pore diffusion) ถ้าน้ำมีความดันป้อนต่ำจะทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำรอบคาร์บอนมีความหนามาก เป็นอุปสรรคต่อการแพร่ผ่านของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าไปยังตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ แต่ถ้ามีความดันป้อนสูงชั้นฟิล์มจะบางลงเป็นผลทำให้โมเลกุลสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเข้าสู่ตัวดูดซับได้เร็วกว่าการแพร่เข้าไปในรูพรุน กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่ออัตราการดูดซับของตัวดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิว โดยพบว่าอัตราการดูดซับแปรผันแบบผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับขนาดเล็กจะมีอัตราการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับขนาดใหญ่ ส่วนความสามารถในการดูดซับ (adsorptive capacity) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของรูพรุน ดังนั้นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกันจะมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันแต่อัตราในการดูดซับไม่เท่ากัน

3.3 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกละลายจะแยกออกจากน้ำไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง ทำให้ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างความสามารถในการดูดซับกับ

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับได้ เนื่องจากมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่เกาะติดตัวดูดซับได้ยาก และสารที่ละลายน้ำได้ดีบางชนิดถูกดูดซับได้ง่าย

3.4 ขนาดของตัวถูกดูดซับ

ขนาดของโมเลกุลมีผลต่อการดูดซับซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย (เข้าไปในโพรงได้พอดี) ซึ่งทำให้แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง

3.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนยังเป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี

3.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

3.7 เวลาสัมผัส

เวลาที่สารละลายอยู่ในถังดูดซับยิ่งนานและปริมาณของสารถูกละลาย (สารถูกดูดซับ) จำนวนน้อยๆ จะทำให้อายุการใช้งานของสารดูดซับนานขึ้น นอกจากนี้ Cheremissinoff *et al.* (1976) ได้แนะนำไว้ว่าเพื่อให้แน่ใจว่าการดูดซับเป็นไปอย่างเหมาะสม สารละลายควรมีเวลาพักเก็บในชั้นสารดูดซับนานประมาณ 30 นาที ในระหว่างที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนผิวของสารดูดซับ โดยโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของสารดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยมากเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนสารดูดซับ

4. ประโยชน์ของการดูดซับ

สารดูดซับที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้ถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- 1) กำจัดสี กลิ่น รส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก
- 2) กำจัดคลอรีน
- 3) กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- 4) กำจัดยาฆ่าแมลง
- 5) กำจัดผงซักฟอก
- 6) กำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอล
- 7) กำจัดไฮโดรคาร์บอน

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี แต่ราคาค่อนข้างสูง จึงมีการศึกษาในการใช้สารดูดซับชนิดอื่นขึ้นแทน

5. สมดุลของการดูดซับ

สมดุลเกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) เคลื่อนย้ายจากน้ำเข้ามายังตัวดูดซับ (adsorbent) จนกระทั่งความเข้มข้นของ adsorbate ในน้ำเท่ากับความเข้มข้นใน adsorbent ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ นั้นเราใช้ adsorption isotherm เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

adsorption isotherm คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของ adsorbent และความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ แล้วนำไปสร้างกราฟ โดยให้ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนนอน และปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก adsorbent เป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า adsorption isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำ และเพื่อเปรียบเทียบชนิด adsorbent ที่ดีที่สุด

จาก isotherm test สามารถเลือกชนิดถ่านที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้อาจไม่เพียงพอต่อการออกแบบ จะต้องมีการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ เพื่อหาอายุการใช้งานของตัวดูดซับที่เลือกมีอายุยาวนานเท่าไรจึงจะเสื่อมคุณภาพ (ปัญญา, 2543)

6. การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ

down flow ให้น้ำไหลผ่านโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก แต่เมื่อตัวดูดซับเสื่อมสภาพ จะต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่หมดทั้งคอลัมน์

up flow ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับขึ้นข้างบน แต่มีข้อดีคือสามารถจะฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพแล้วได้เป็นระยะๆ โดยเอาออกทางข้างล่างของคอลัมน์

7. ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบต่อเนื่องของคอลัมน์

- 7.1 จะให้น้ำไหลลงข้างล่าง (down flow) หรือขึ้นข้างบน (up flow)
- 7.2 จะใช้หน่วยเดียวหรือหลายๆ หน่วยเป็นแบบอนุกรม หรือขนานก็ได้
- 7.3 ถ้าเลือกให้น้ำไหลลงข้างล่างจะให้ไหลด้วยแรงดัน (pressure) หรือไหลด้วย gravity
- 7.4 ถ้าเลือกให้น้ำทั้งไหลขึ้นข้างบน จะให้ชั้นตัวดูดซับอัดกันแน่น (packed bed) หรือขยายตัวได้ (expanded bed) เมื่อมีน้ำไหลผ่าน
- 7.5 ลักษณะของถังที่บรรจุชนิดของวัสดุที่ใช้ทำถัง

8. ข้อจำกัดในการทำคอลัมน์ทดสอบ มีปัจจัยที่ต้องคำนึงดังนี้

8.1 เวลาสัมผัส (contact time)

เวลาสัมผัสที่นิยมปฏิบัติมักไม่เกิน 20 นาที เพราะถ้าใช้เวลานานเกินไปแล้วจะเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนได้ เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์ ถ้าสารอินทรีย์นั้นมีองค์ประกอบของกำมะถันอยู่ด้วย

8.2 ชนิดของสาร

ชนิดของสารในน้ำทิ้งว่าโพลาร์หรือนอนโพลาร์โมเลกุล มีจำนวนอะตอมของ C มากหรือน้อย โมเลกุลของสารจะต้องเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับ

8.3 คุณสมบัติของตัวดูดซับ

ต้องทราบคุณสมบัติของตัวดูดซับว่ามีพื้นที่ผิวมากน้อยอย่างไร ขนาดตลอดจนความหนาแน่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (สุจินต์, 2544)

เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

1. ขั้นตอนการเกิดเถ้าก้นเตา

ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินจะถูกโม่บดเป็นผงละเอียด (pulverized) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในเตา เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจะถูกส่งไปยังเตาเผาไหม้ถ่านหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระแสไฟฟ้า ภายหลังจากการเผาไหม้ถ่านหินแล้วจะเกิดเถ้า 2 ชนิด คือเถ้าลอย (fly ash) กับเถ้าก้นเตา (bottom ash) คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 80:20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน ชนิดของเตาเผา กระบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยเถ้าก้นเตาจะตกลงก้นถึง ส่วนเถ้าลอยจะลอยขึ้นและถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator, ESP) บริเวณปล่องของโรงไฟฟ้าถ่านหิน

2. คุณลักษณะโดยทั่วไปของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาคือ กากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและละเอียดปะปนกัน ซึ่งได้จากการเผาไหม้ถ่านหินตามกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้คุณภาพรองจากแร่แอนทราไซต์ มีเนื้อแข็ง สีน้ำตาลถึงดำลักษณะมันวามีเหลี่ยมคมมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ พื้นผิวเป็นแบบขรุขระ คล้ายกับทราย ไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค (อุมาพร, 2553)

เถ้าก้นเตาเกิดมาจากถ่านหินซึ่งถูกบดละเอียดและเผาในอุณหภูมิสูงถึงระดับ 900°C - 1500°C เช่นเดียวกันแต่เกิดการรวมตัวของอนุภาคแทนที่จะลอยออกไปแล้วตกลงสู่ข้างล่าง จึงทำให้มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาต่างๆ แต่จะพบว่าขนาดความไวต่อปฏิกิริยาเคมีไม่เหมือนกับเถ้าลอย จึงยังไม่มีผู้ใดนำมาใช้ประโยชน์เป็นสารเชื่อมประสานในงานก่อสร้าง แต่สามารถนำไปใช้แทนที่ทรายในคอนกรีต และทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น

นิพนธ์ (2552) ได้ศึกษาโอกาสในการปนเปื้อนทางสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในการปรับปรุงคุณภาพชั้นปฐพีทาง โดยนำผลการทดสอบหาสารอันตรายในเถ้าก้นเตามาเทียบกับค่า total threshold limit concentration (TTL) และค่า soluble threshold limit concentration (STLC) พบว่ามีความเข้มข้นของโลหะหนักในปริมาณที่ไม่เกินค่ามาตรฐาน

เถ้าลอย (Fly Ash)

1. ขั้นตอนการเกิดเถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash) เป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน สิ่งที่เป็นในถ่านหิน เช่น clay, quartz, และ feldspar จะหลอมตัวเปลี่ยนสภาพลอยขึ้นไปกับอากาศร้อน และผ่านไปยังบริเวณที่เย็นกว่าอย่างรวดเร็ว ทำให้แข็งตัวเป็นอนุภาคกลมขนาดเล็ก เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (pozzolan) ตั้งเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและเป็นผงฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคโดยทั่วไป ซึ่งถูกดักจับด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า electrostatic precipitator ส่วนที่หลอมเกาะกันเป็นก้อนที่มีน้ำหนักรวมมากก็จะตกลงมาเป็นเถ้าก้นเตา (bottom ash)

2. คุณลักษณะทั่วไปของเถ้าลอย

เถ้าลอยถูกแบ่งตามชนิดของถ่านหิน ในส่วนของโครงสร้าง องค์ประกอบทางด้านเคมีหรือคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเถ้าลอยนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของถ่านหินที่นำมาใช้ในการเผาไหม้ ส่วนใหญ่พบว่าประกอบไปด้วยออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา เหล็ก และแคลเซียม ประมาณ 0.5-3.5 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นออกไซด์ของแมกนีเซียม โพแทสเซียม และธาตุอื่นๆ

ปัจจุบันมาตรฐาน ASTM C618-94 (1995) กำหนดประเภทของเถ้าลอยแบบกว้างๆ ออกเป็น 2 ประเภท คือ class F และ class C ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหินเป็นตัวกำหนด

ตารางที่ 1 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (1995)

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, ร้อยละ	70.0	50.0
SO_3 , มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้, มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง, น้อยที่สุดร้อยละ	75.0	75.0

ที่มา : ASTM C618-94a (1995)

เถ้าลอยที่ใช้เป็นสารปอซโซลาน (artificial pozzolan) คือ สารที่มีส่วนประกอบหลักอยู่ในรูปของซิลิกา และอลูมินา อนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมหรือเหลี่ยมขึ้นกับชนิดของถ่านหิน กระบวนการเผา และอุณหภูมิการเผาขนาดของเถ้าลอยมีความละเอียดสูงใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ (กิจจา, 2554)

อัตราส่วนผสมเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย

กิจจา (2554) ศึกษาการใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาวมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาเพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเถ้าก้นเตา ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณของเถ้าลอย เศษปูนขาว และอายุการบ่ม ผลการศึกษาพบว่า วัสดุผสมที่ 1 (เถ้าก้นเตาผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 60:40 โดยใช้สารผสมเพิ่ม (เถ้าลอยและเศษปูนขาว) ในสัดส่วน 75:25 ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มที่ให้ค่า CBR สูงที่สุดประมาณ 293% วัสดุผสมที่ 2 (เถ้าก้นเตาและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ

70:30 โดยใช้วัสดุตั้งต้น (เถ้าก้นเตาและเถ้าลอย) ในสัดส่วน 80:20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้ค่า CBR สูงที่สุดประมาณ 209% และวัสดุผสมที่ 3 (เถ้าก้นเตาผสมเศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 60:40 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้ค่า CBR สูงที่สุดประมาณ 172% ตามลำดับ สำหรับวัสดุตั้งต้นในวัสดุผสมที่ 2 ที่มีปริมาณเถ้าก้นเตาเป็นหลักและเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ซึ่งพอที่จะสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาได้ในระดับหนึ่ง และได้พิจารณาสัดส่วนผสมของวัสดุตั้งต้นที่ให้ค่า CBR มากที่สุดคือ ปริมาณเถ้าก้นเตา 80% ต่อปริมาณเถ้าลอย 20% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยในสัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Diamadopoulos *et al.* (1993) ศึกษาวิจัยเรื่องการนำเถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำ โดยในการทดลองนี้จะใช้เถ้าลอย 1 กรัม เพื่อกำจัดอาร์เซนิกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และค่าพีเอชเท่ากับ 10 ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าความเข้มข้นที่เหลือของอาร์เซนิกในน้ำจะขึ้นอยู่กับเวลา กล่าวคือที่ 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นก็จะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ และที่พีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 30 มิลลิกรัม อาร์เซนิกต่อกรัมเถ้าลอย 1 กรัม และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3 และ 4 เท่าเมื่อเทียบกับที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองการคายการดูดซับจากผิวเถ้าลอย พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 จะมีการคายการดูดซับต่ำที่สุดคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 10 จะมีการคายการดูดซับเท่ากับ 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Dzombak and Lagnese (1993) ศึกษาถึงการใช้อะชเซดิเม้นเตชัน (ash sedimentation) ในโรงไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานจากถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นขั้นตอนหนึ่งของการบำบัดน้ำภายในโรงไฟฟ้าที่มีการเจือปนของโลหะ โดยอาศัยปฏิกิริยาการดูดซับและการตกตะกอนร่วมของเถ้าลอย และ/หรือ iron oxyhydroxide โดยในการทดลองนี้จะเน้นการกำจัดอลูมิเนียม แมงกานีส และอาร์เซนิกในน้ำ โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในการควบคุมค่าพีเอชภายใต้สภาวะที่มีการกวนน้อยที่สุด (weak mixing condition) รวมทั้งมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ เพื่อส่งเสริมการดูดซับบน iron oxyhydroxide ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าควรควบคุมค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าระบบ

บำบัดให้อยู่ในช่วง 8 – 8.5 จะทำให้แมงกานีสที่มีในน้ำลดลงจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 จะทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่พีเอชนี้การเติมเฟอร์ริกคลอไรด์จะไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหลือในน้ำแต่กรณีที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 7.5 จะพบว่ามีความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหลือในน้ำสูงมากขึ้น ส่วนผลการทดลองของอูมิเนียมจะให้ผลใกล้เคียงกับแมงกานีสต่างกันตรงที่ค่าพีเอชคือที่พีเอชใกล้เคียงกับ 7 ทำให้มีความเข้มข้นของอูมิเนียมที่เหลือในน้ำน้อยที่สุดคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ Konduru and Viraraghavan (1997) ได้พบว่าขี้เถ้าลอยมีส่วนช่วยในการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดสีในน้ำเสียโดยใช้เป็นการบำบัดเบื้องต้นก่อนบำบัดด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการบำบัดจะขึ้นกับปริมาณของขี้เถ้าลอยและระยะเวลาสัมผัส โดยค่า pH ไม่มีผลต่อการบำบัด

Panday *et al.* (1987) ศึกษาถึงการใช้ขี้เถ้าลอยในการกำจัดแคดเมียม โดยในการทดลองได้ใช้ขี้เถ้าลอยปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือโดยใช้ dithizone method ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อพีเอชเท่ากับ 8.5 โดยเวลาที่ใส่จะให้เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นจาก 84.80 เปอร์เซ็นต์ เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของการดูดซับจะถูกระบุโดยสมการของ langmuir isotherm ผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมีสูงมาก กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอชจาก 4 เป็นค่าพีเอช 8.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มจาก 11.85 % เป็น 89.82 % และยังพบอีกด้วยว่า การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจะลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10

Tiwan *et al.* (1993) ศึกษาถึงการนำ ขี้เถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดโลหะแมงกานีสจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพของการกำจัดจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นค่าพีเอชและอุณหภูมิ โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช เท่ากับ 8 จะใช้เวลาเพื่อให้เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 2 ชั่วโมง โดยสามารถกำจัดได้ 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 9 จะสามารถกำจัดได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

Yadava *et al.* (1989) ได้ศึกษาถึงการนำ ขี้เถ้าลอยมาใช้ในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ขี้เถ้าลอยปริมาณ 1 กรัม เขย่าในสารละลายตะกั่วสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเท่ากับ 6.4 พบว่าประสิทธิภาพในการ

กำจัดตะกั่วจะลดลงจาก 88.10 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร

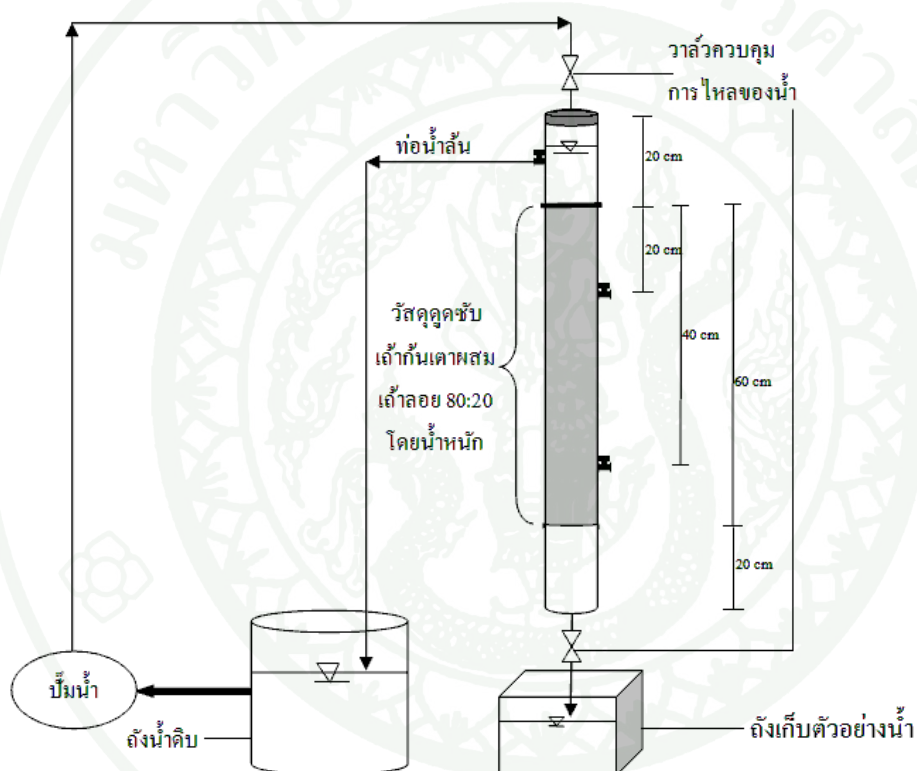
นฤมิต (2538) ศึกษาการทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความให้ซึมได้ โดยทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก 3 ชนิด คือ โปรท โครเมียม และเหล็ก จากผลการทดลองพบว่า การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 เป็นวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่โครเมียมมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวและเหล็กมีค่าต่ำมาก ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของโปรท โครเมียม และเหล็กเท่ากับ 30.7, 50 และ 90 % ตามลำดับ และค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนมีค่า 3,600 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนักแห้ง

อภิสิทธิ์ (2539) ศึกษาการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในการกำจัดสี โดยสีย้อมที่ใช้ในการทดลอง 7 ประเภท ดังนี้คือ สีเบสิก, สีเบสิก, สีรีแอคทีฟ, สีซัลเฟอร์, สีไครเรท, สีดิสเพอร์ส และสีฟักเมนต์ พบว่าการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลายสีในช่วง 4–8 ไม่ค่อยมีผลต่อการดูดซับสีของจีเถ้าลอยลิกไนต์มากนัก แต่ประเภทสีเบสิกมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ดีในช่วงที่เป็นกรด ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของไอออนประจุลบในส่วนประกอบของสีกับผิวภายนอกของจีเถ้าลอย และได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสี พบว่าการนำจีเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอุณหภูมิช่วง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำในสภาพแวดล้อมธรรมชาติของประเทศไทย จะมีผลต่อการดูดซับเล็กน้อยสำหรับค่าสารอินทรีย์ในรูปของ COD นั้น สีต่างชนิดกันจะมีค่า COD แตกต่างกันไป คือมีค่าเริ่มต้นอยู่ในช่วง 42–146 มิลลิกรัมต่อลิตร และการใช้จีเถ้าลอยลิกไนต์ในการกำจัดสีจะช่วยลดค่า COD ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 20.8 – 89.4 จากการนำจีเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้กับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมภายหลังการบำบัดจากระบบตะกอนเร่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ถังกรองรูปทรงกระบอกทำจากอะคริลิก เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.4 เซนติเมตร สูง 1 เมตร
พื้นที่หน้าตัด 43 ตารางเซนติเมตร ปริมาตร 4.3×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร บรรจุตัวดูดซับสูง 60
เซนติเมตร มีปริมาตร 2,580 ลูกบาศก์เซนติเมตร



ภาพที่ 3 แสดงแบบการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง

2. ปั๊มน้ำ (peristaltic pump)
3. ท่อน้ำใช้ท่อที่เป็นสายยางพลาสติกและสายซิลิโคนในบางจุด
4. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (atomic adsorption spectrophotometer: AAS)
5. เครื่องแก้วสำหรับการทดลอง
6. เครื่องบด

วิธีการ

1. การเตรียมเถ่าก้นเตาและเถ่าลอย

ผสมวัสดุเถ่าลอยและเถ่าก้นเตา ในอัตราส่วนผสมที่ 80: 20 ของน้ำหนัก

2. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้จากสารละลายมาตรฐาน แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), อาร์เซนิก (As) โดยเริ่มต้นจากนำสารละลายมาตรฐานแต่ละชนิด มา 250 มิลลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิตรในขวดปรับปริมาตรนำมาเติมในน้ำกลั่น ปริมาตร 49 ลิตร ที่เตรียมไว้ในถังน้ำเสียสังเคราะห์กวนผสมให้เข้ากัน โดยทำการทดสอบ สารทีละชนิด

3. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยเถ่าลอยและเถ่าก้นเตา

3.1 ปล่อน้ำเสียสังเคราะห์ลงสู่คอลัมน์ที่บรรจุเถ่าลอยและเถ่าก้นเตาความสูง 60 ซม.

3.2 ตรวจวัดปริมาณแคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), อาร์เซนิก (As) ความขุ่นและของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วโดยทำการตรวจวัดทุก 1 ชม. ซึ่งระบบการกรองเป็นแบบการกรองจากส่วนบนลงสู่ส่วนล่าง

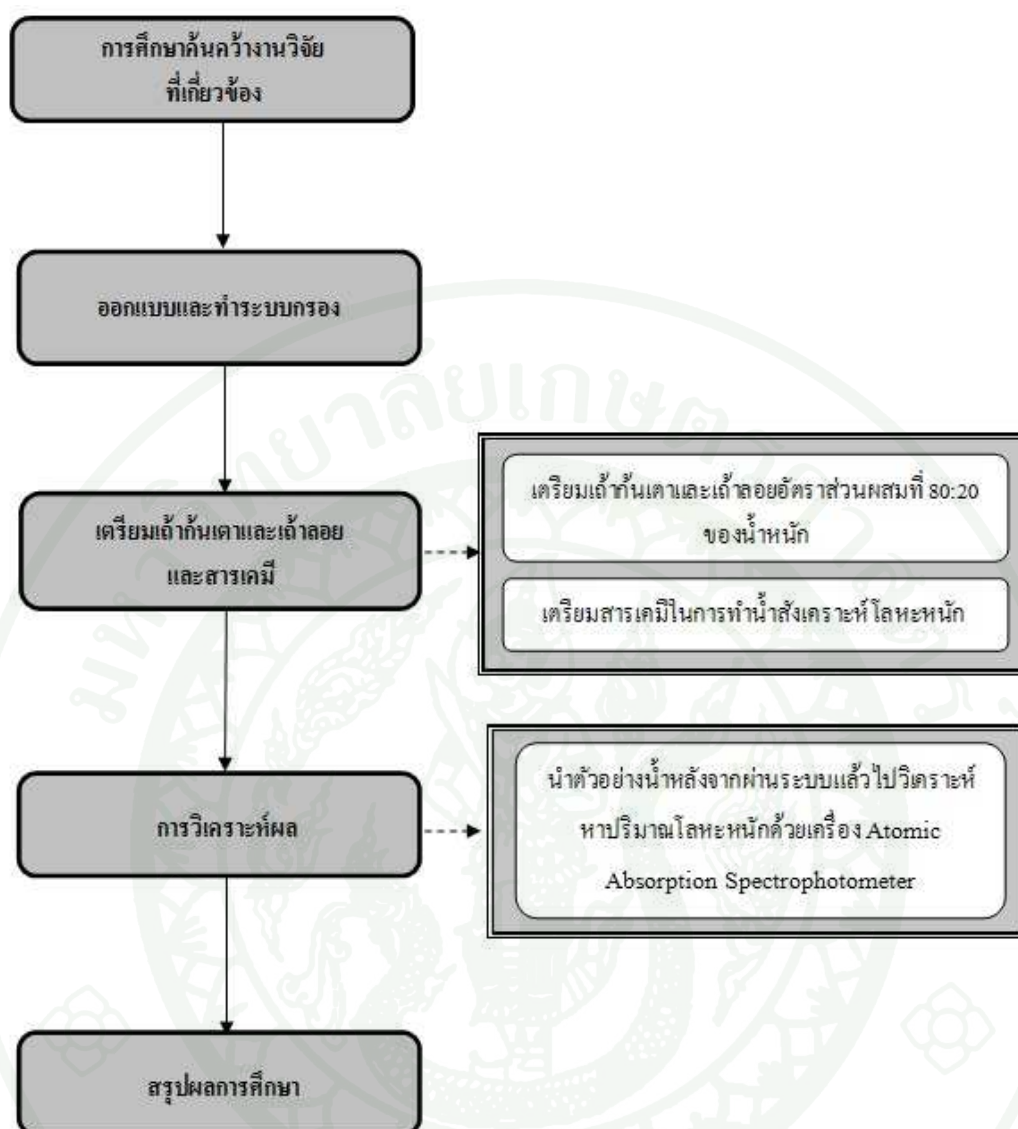
3.3 น้ำเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุเถ่าลอยและเถ่าก้นเตา โดยใช้อัตราน้ำล้นผิว ดังตารางที่ 2 ซึ่งดำเนินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชม. และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังตารางที่ 2, 3 และภาพที่ 4

ตารางที่ 2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับด้วยถ้ำลอยและถ้ำก้นเตา

อัตราน้ำล้นผิว (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)	อัตราการไหล (ลิตร/วัน)
0.4	41.28
0.5	51.6
0.6	61.92

ตารางที่ 3 แสดงพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	น้ำเข้า	น้ำออก
แคลเซียม	ทุกวัน	ทุก 1 ชั่วโมง
ตะกั่ว	ทุกวัน	ทุก 1 ชั่วโมง
สารหนู	ทุกวัน	ทุก 1 ชั่วโมง
ความขุ่น	ทุกวัน	ทุก 1 ชั่วโมง
ของแข็งแขวนลอย	ทุกวัน	ทุก 1 ชั่วโมง
pH	ทุกวัน	ทุก 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการวิจัย

4. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

5. แผนดำเนินการ

เริ่มดำเนินการศึกษาข้อมูลข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา ณ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 และทำการ
เดินระบบและวิเคราะห์ผลการทดลองถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2554 ดังแผนดำเนินการในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แผนดำเนินการในงานวิจัย

ขั้นตอนการทำวิจัย	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา	■	■	■									
จัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย		■	■	■								
ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย			■	■	■							
เริ่มดำเนินการทดลอง				■	■	■	■	■	■			
วิเคราะห์ผลการทดลอง						■	■	■	■	■		
สรุปผลประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง									■	■	■	
เขียนรายงานวิจัย/พร้อมทั้งส่งบทความเพื่อการตีพิมพ์									■	■	■	

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ้ำลอยและถ้ำก้นเตา และเพื่อศึกษาอัตราการกรองที่มีประสิทธิภาพในบำบัด จากการทดลองให้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านคอลัมน์วัสดุผสมบดอัดของถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ของวัสดุผสมถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาเป็นดังนี้

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับ

ทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาของประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของกระบวนการดูดซับด้วยถ้ำลอยและถ้ำก้นเตา ประสิทธิภาพของการเดินระบบที่ 8 ชั่วโมงแรก ประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างสูงและมีค่าแตกต่าง หลังจากชั่วโมงที่ 8 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างต่ำและมีค่าในแต่ละชั่วโมงไม่แตกต่างกันมาก จึงไม่นำมาทดลอง และจากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราน้ำล้นผิวเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

1. ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

1.1 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม

ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับแคดเมียมอยู่ในช่วง 43.25–99.80% ตามตารางที่ 5 และภาพที่ 5 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

1.2 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนักมีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.0–174.7 มก./ล. ตามตารางที่ 5 และภาพที่ 6 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

1.3 ความขุ่น

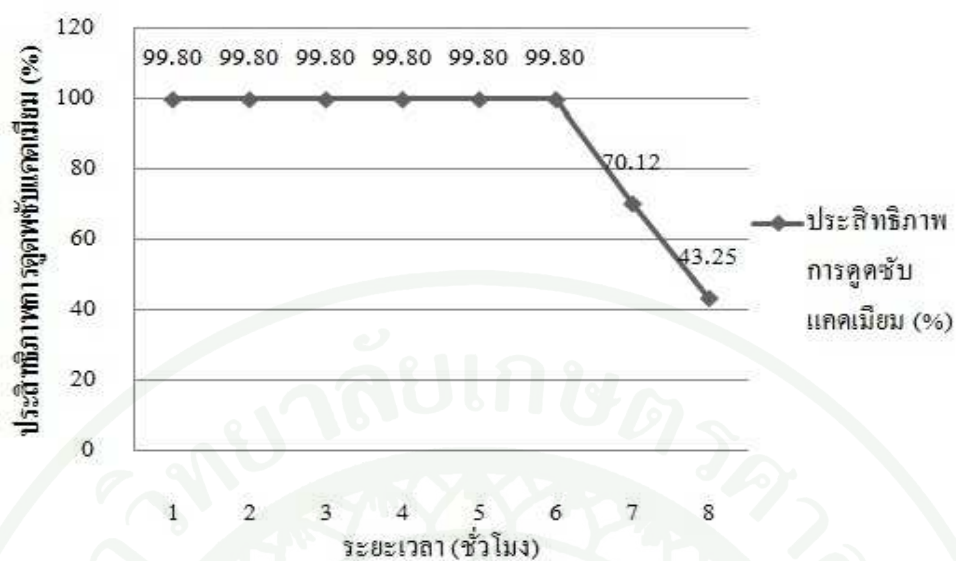
ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.4–75.0 NTU ตามตารางที่ 5 และภาพที่ 7 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

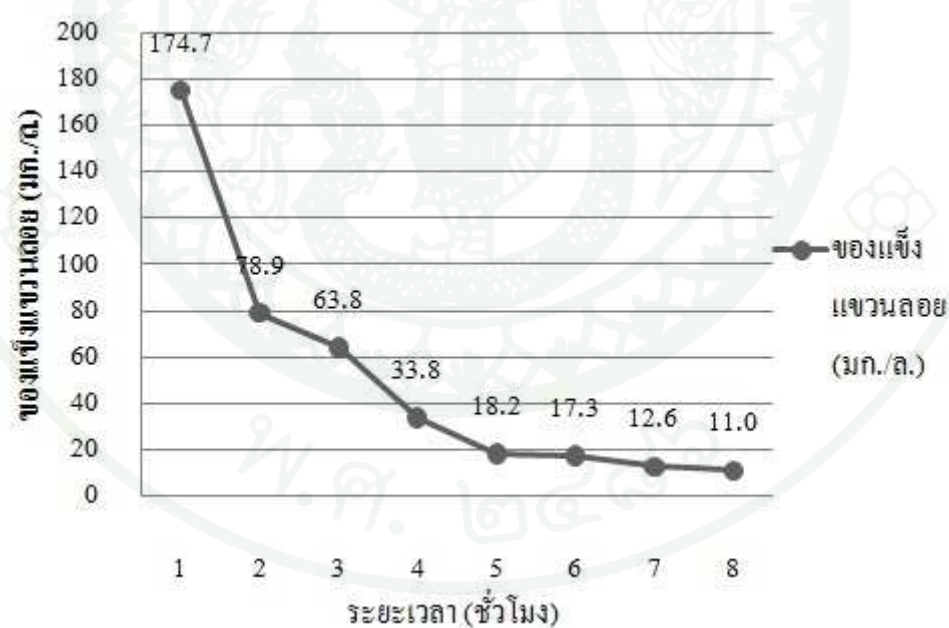
ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียมเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.11				2.46
1	ND	99.80	174.7	75.0	7.48
2	ND	99.80	78.9	47.2	7.43
3	ND	99.80	63.8	28.2	7.49
4	ND	99.80	33.8	9.5	7.48
5	ND	99.80	18.2	6.7	7.48
6	ND	99.80	17.3	5.3	7.40
7	1.53	70.12	12.6	2.6	7.41
8	2.90	43.25	11.0	1.4	7.43

หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection

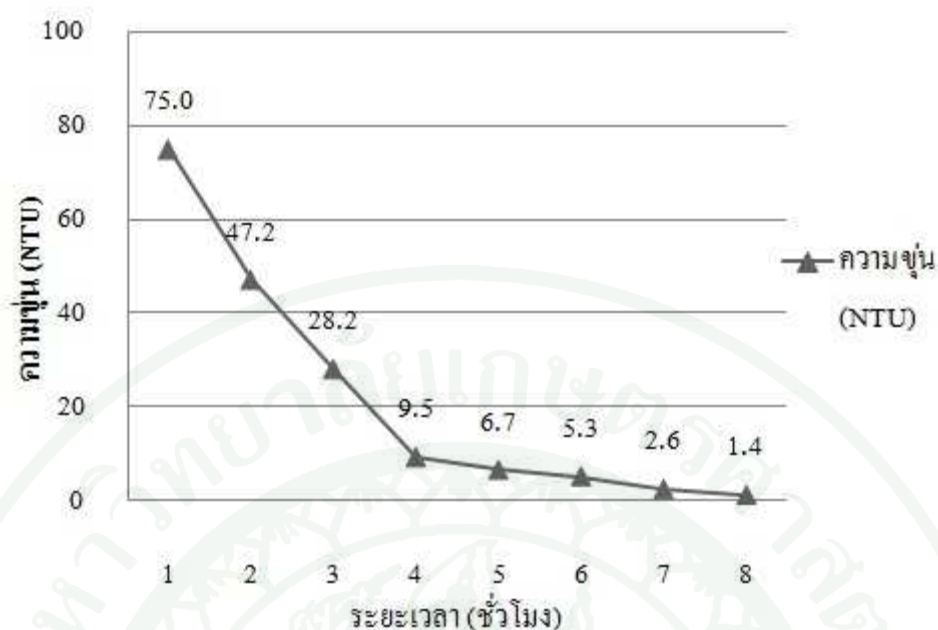
Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



ภาพที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 6 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 7 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

1.4 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว

ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถั่วลอยและถั่วก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับตะกั่วอยู่ในช่วง 88.32–99.80% ตามตารางที่ 6 และภาพที่ 8 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

1.5 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถั่วลอยและถั่วก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 10.7–162.2 มก./ล. ตามตารางที่ 6 และภาพที่ 9 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

1.6 ความขุ่น

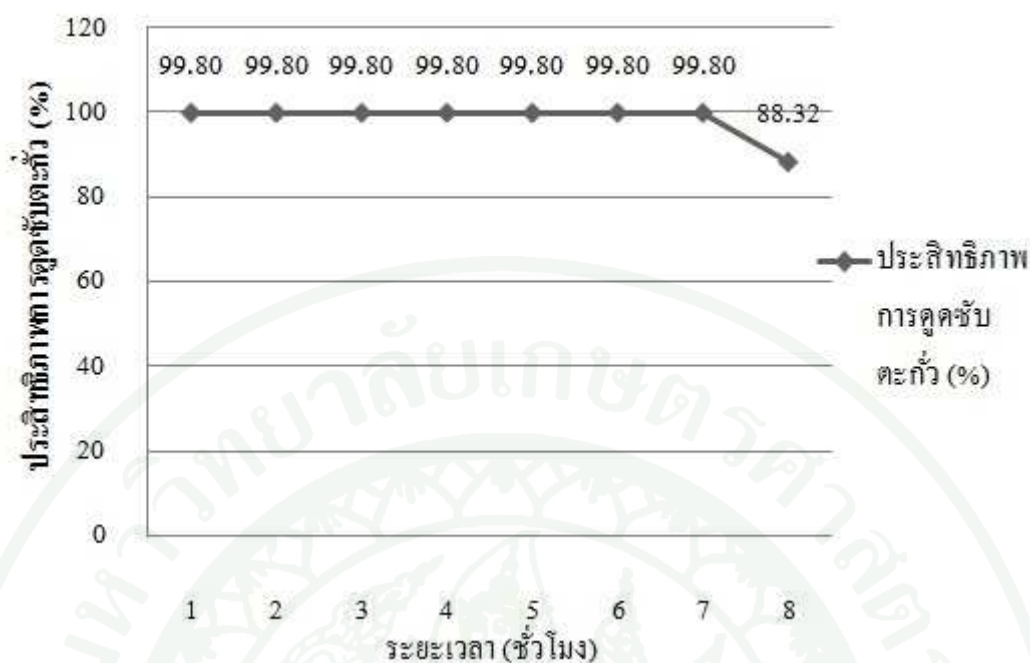
ที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและ
ถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.3–66.2 NTU ตาม
ตารางที่ 6 และภาพที่ 10 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเฉลี่ยที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ
60 ซม.

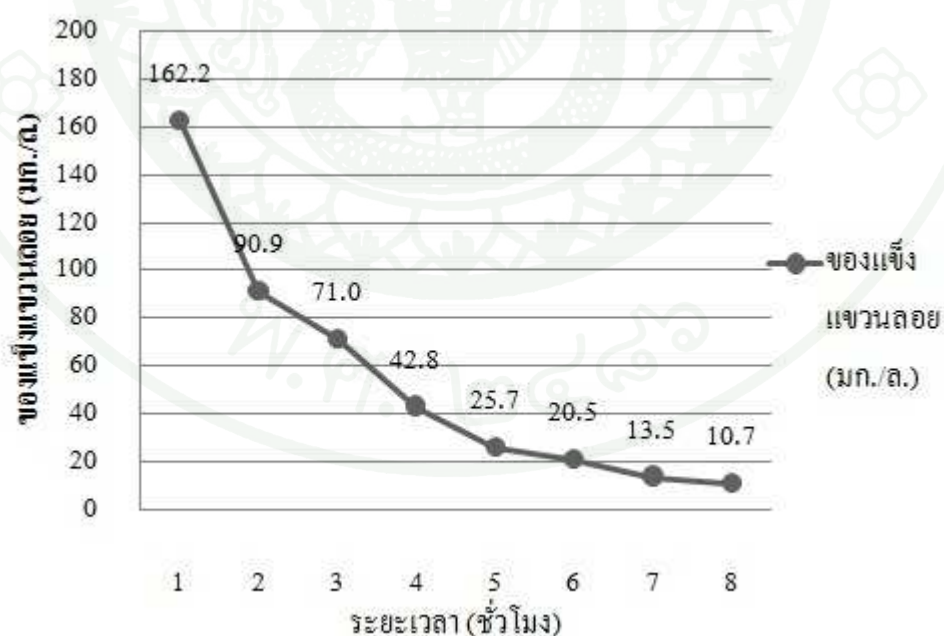
ชั่วโมงที่	การดูดซับ ตะกั่วเฉลี่ย(มก./ ล.)	ประสิทธิภาพ การดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.09				2.41
1	ND	99.80	162.2	66.2	7.45
2	ND	99.80	90.9	43.9	7.44
3	ND	99.80	71.0	32.3	7.42
4	ND	99.80	42.8	15.2	7.43
5	ND	99.80	25.7	6.9	7.45
6	ND	99.80	20.5	4.6	7.49
7	ND	99.80	13.5	3.1	7.45
8	0.59	88.32	10.7	2.3	7.41

หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection

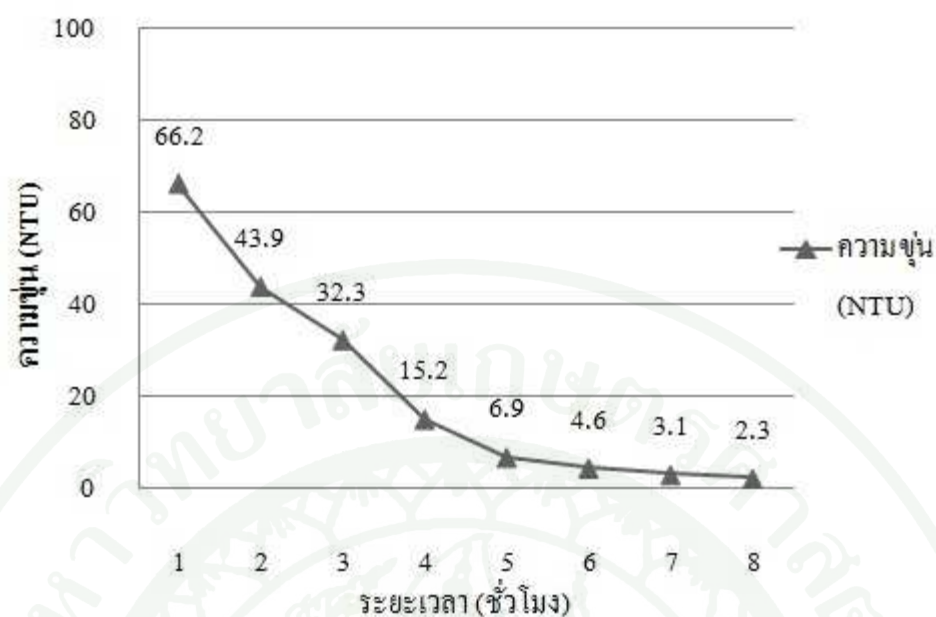
Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



ภาพที่ 8 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 9 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 10 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

1.7 ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิก

ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับอาร์เซนิกอยู่ในช่วง 88.99–99.81% ตามตารางที่ 7 และภาพที่ 11 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

1.8 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.4–176.4 มก./ล. ตามตารางที่ 7 และภาพที่ 12 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

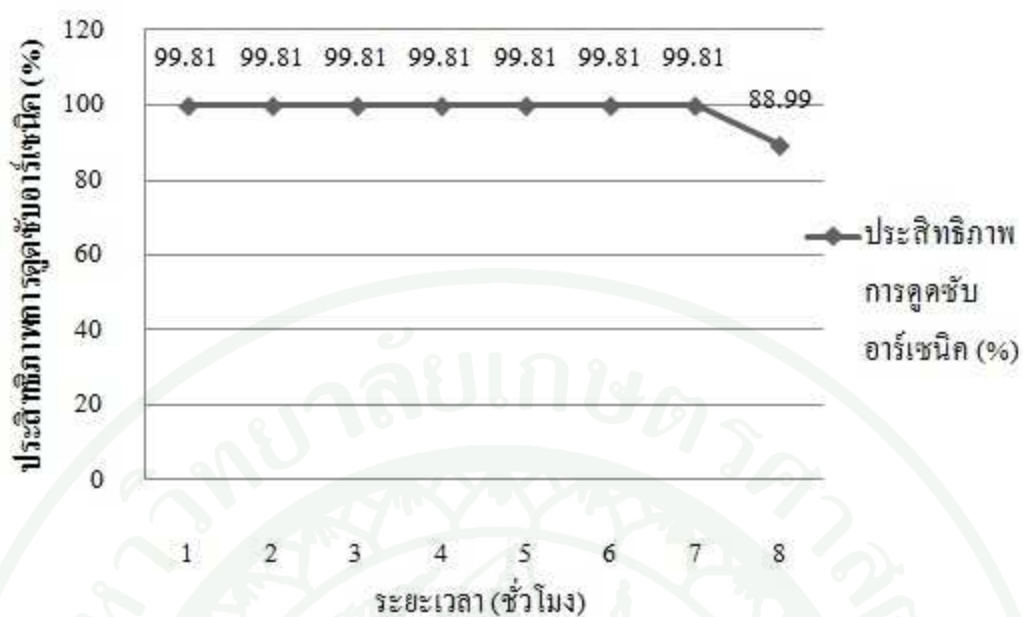
1.9 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับเถ้าลอยและเถ้า
ก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นในช่วง 1.8–73.4 NTU ตามตารางที่ 7
และภาพที่ 13 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

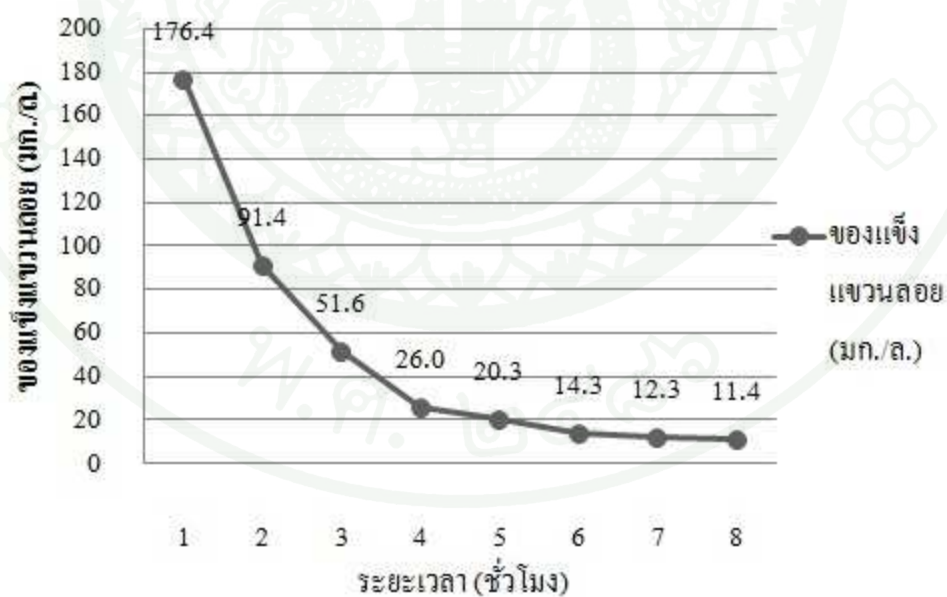
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ
60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ อาร์เซนิกเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.44
1	ND	99.81	176.4	73.4	7.49
2	ND	99.81	91.4	47.8	7.47
3	ND	99.81	51.6	22.9	7.46
4	ND	99.81	26.0	14.4	7.41
5	ND	99.81	20.3	9.5	7.42
6	ND	99.81	14.3	5.3	7.43
7	ND	99.81	12.3	3.9	7.44
8	0.57	88.99	11.4	1.8	7.43

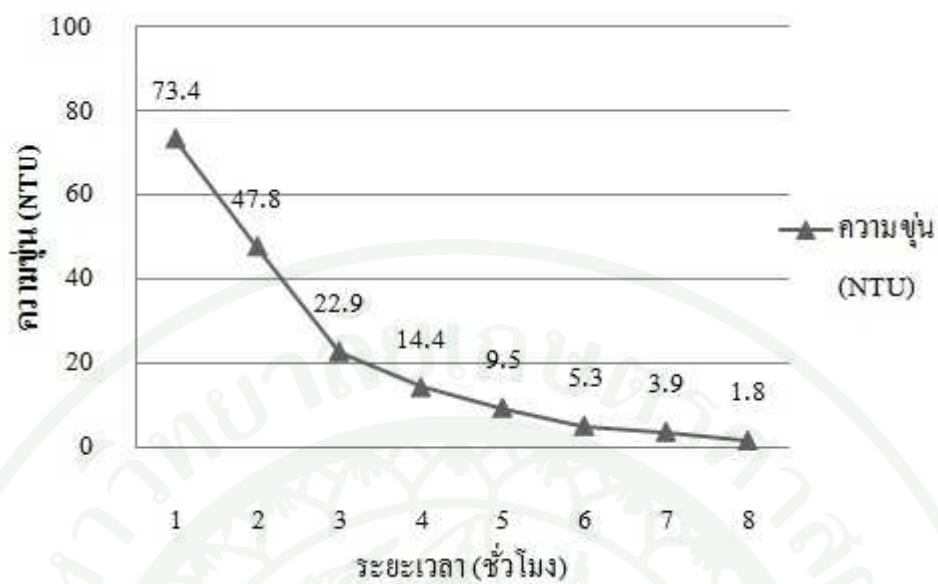
หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection
Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



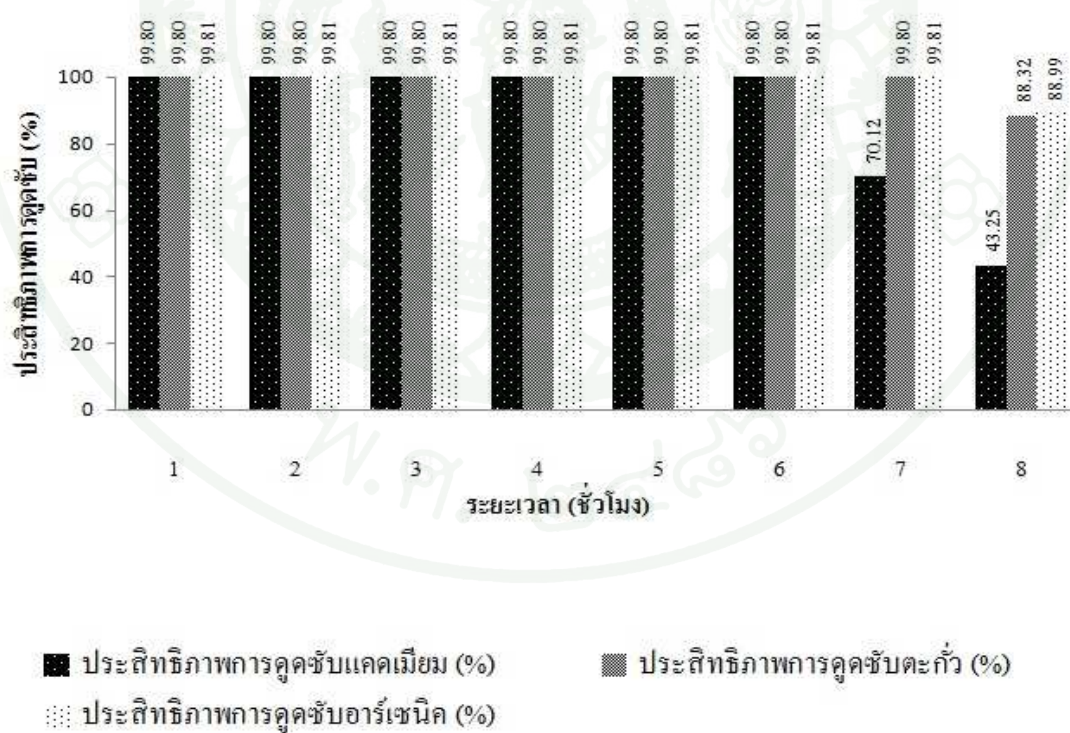
ภาพที่ 11 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 12 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 13 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 14 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

2. ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

2.1 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม

ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับแคดเมียมอยู่ในช่วง 30.05–99.80% ตามตารางที่ 8 และภาพที่ 15 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

2.2 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.2–153.8 มก./ล. ตามตารางที่ 8 และภาพที่ 16 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

2.3 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.0 – 57.1 NTU ตามตารางที่ 8 และภาพที่ 17 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

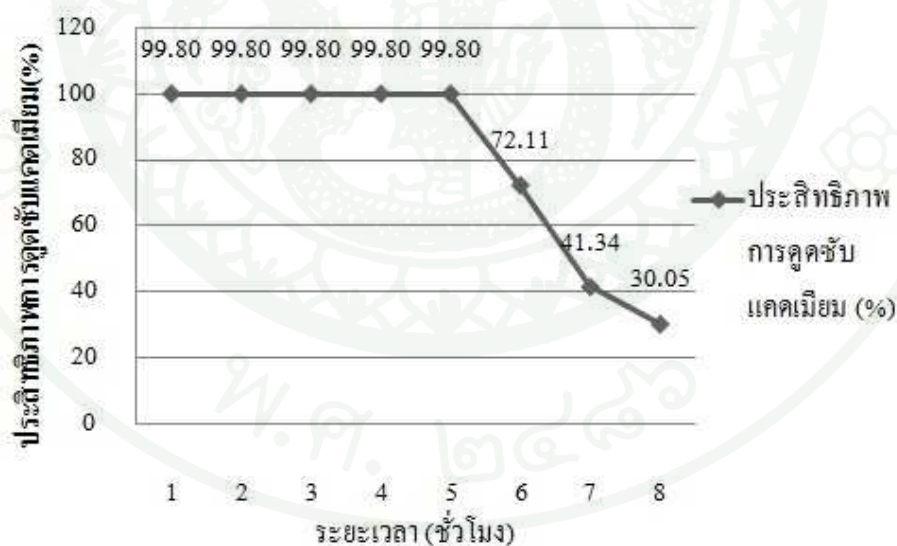
วัสดุดูดซับ 60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียมเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.43
1	ND	99.80	153.8	57.1	7.46
2	ND	99.80	69.1	41.4	7.48

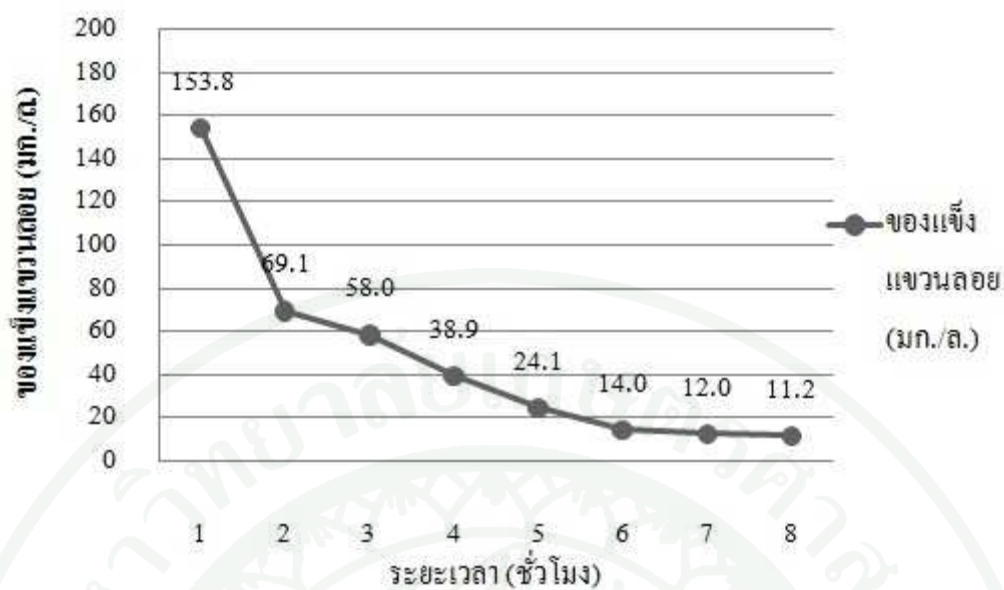
ตารางที่ 8 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียมเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
3	ND	99.80	58.0	25.1	7.44
4	ND	99.80	38.9	17.2	7.47
5	ND	99.80	24.1	12.0	7.44
6	1.42	72.11	14.0	5.2	7.43
7	2.98	41.34	12.0	2.6	7.40
8	3.55	30.05	11.2	2.0	7.40

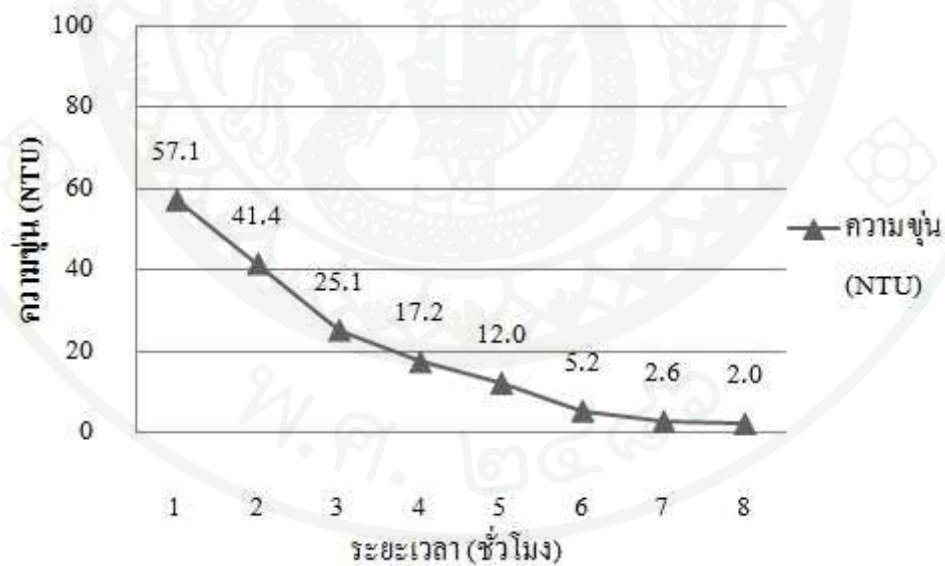
หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



ภาพที่ 15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำสั่นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม.
วัสดุดูดซับ 60 ชม.



ภาพที่ 16 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 17 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

2.4 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว

ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถั่วลอยและถั่วก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับตะกั่วอยู่ในช่วง 45.39–99.81% ตามตารางที่ 9 และภาพที่ 18 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

2.5 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถั่วลอยและถั่วก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.1–164.3 มก./ล. ตามตารางที่ 9 และภาพที่ 19 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

2.6 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถั่วลอยและถั่วก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.9–56.3 NTU ตามตารางที่ 9 และภาพที่ 20 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

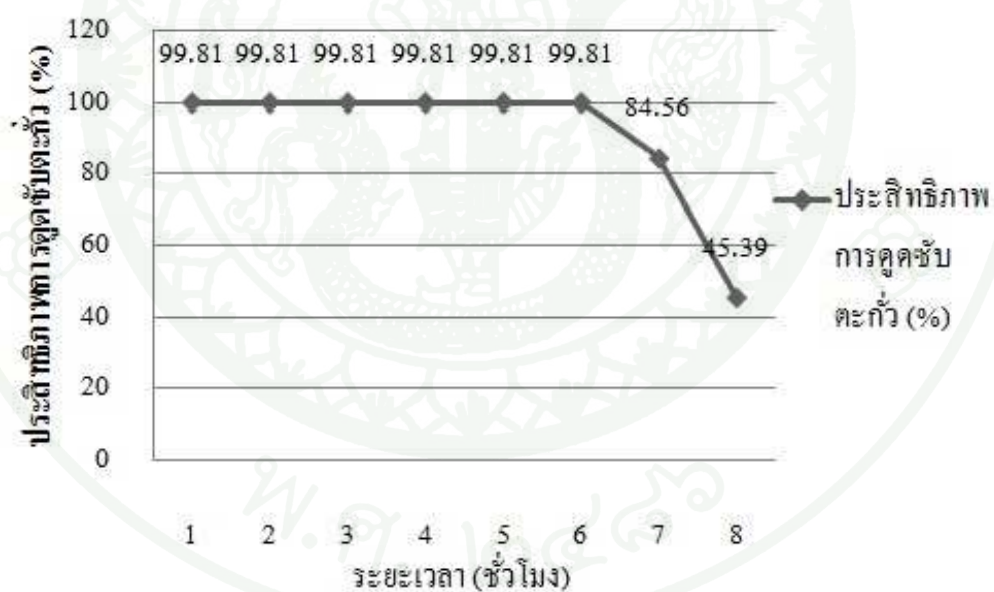
ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ ตะกั่วเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.14				2.48
1	ND	99.81	164.3	56.3	7.43
2	ND	99.81	73.3	38.6	7.45
3	ND	99.81	56.9	26.4	7.47
4	ND	99.81	43.5	15.8	7.43

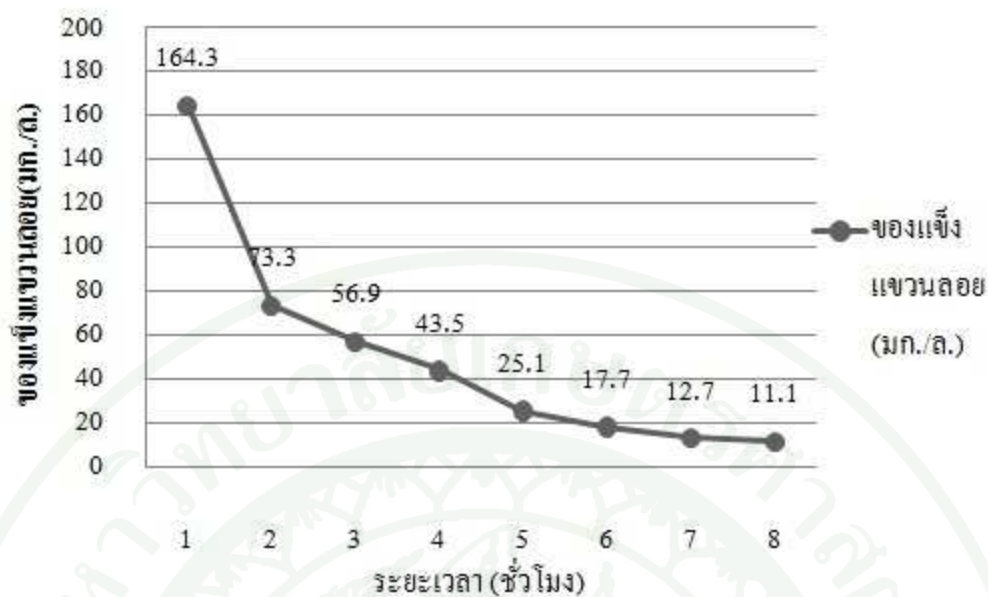
ตารางที่ 9 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	การดูดซับ ตะกั่วเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
5	ND	99.81	25.1	11.9	7.44
6	ND	99.81	17.7	6.0	7.43
7	0.79	84.56	12.7	3.7	7.44
8	2.81	45.39	11.1	1.9	7.46

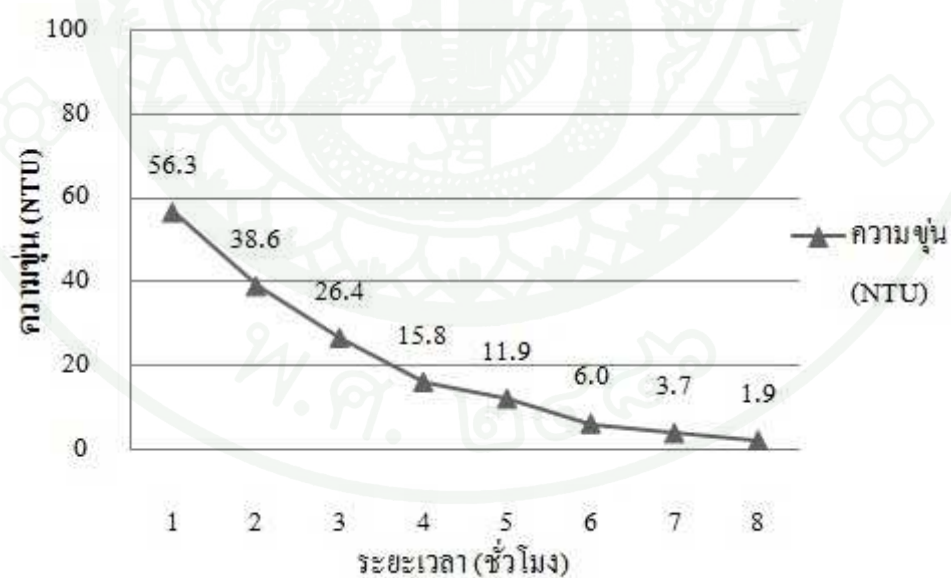
หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



ภาพที่ 18 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุ
ดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 19 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 20 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

2.7 ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิก

ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับอาร์เซนิกอยู่ในช่วง 44.40–99.81% ตามตารางที่ 10 และภาพที่ 21 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

2.8 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.5–169.2 มก./ล. ตามตารางที่ 10 และภาพที่ 22 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

2.9 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.3–62.3 NTU ตามตารางที่ 10 และภาพที่ 23 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

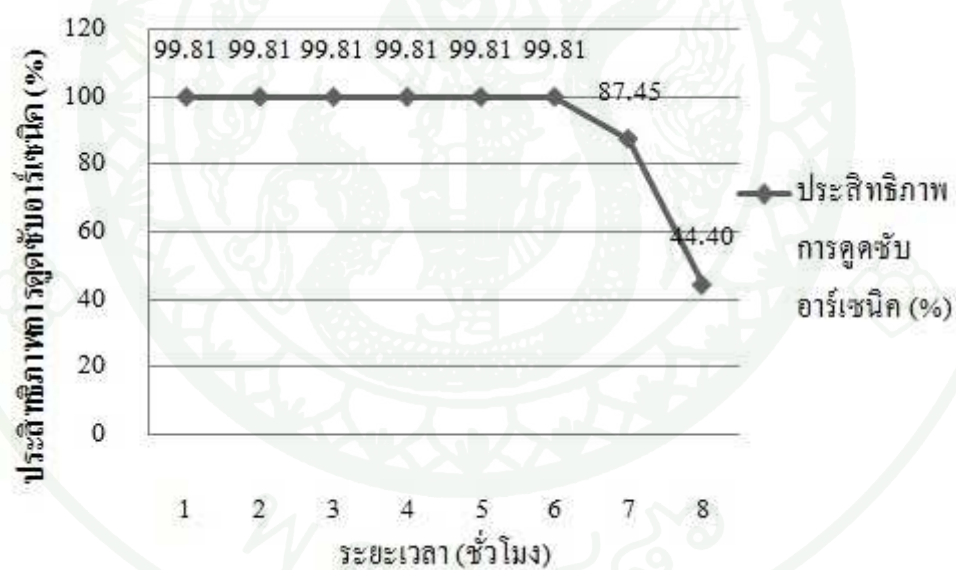
ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ อาร์เซนิกเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.46
1	ND	99.81	169.2	62.3	7.47
2	ND	99.81	78.8	46.8	7.43
3	ND	99.81	58.2	27.5	7.44
4	ND	99.81	39.5	20.8	7.46
5	ND	99.81	27.7	14.1	7.45

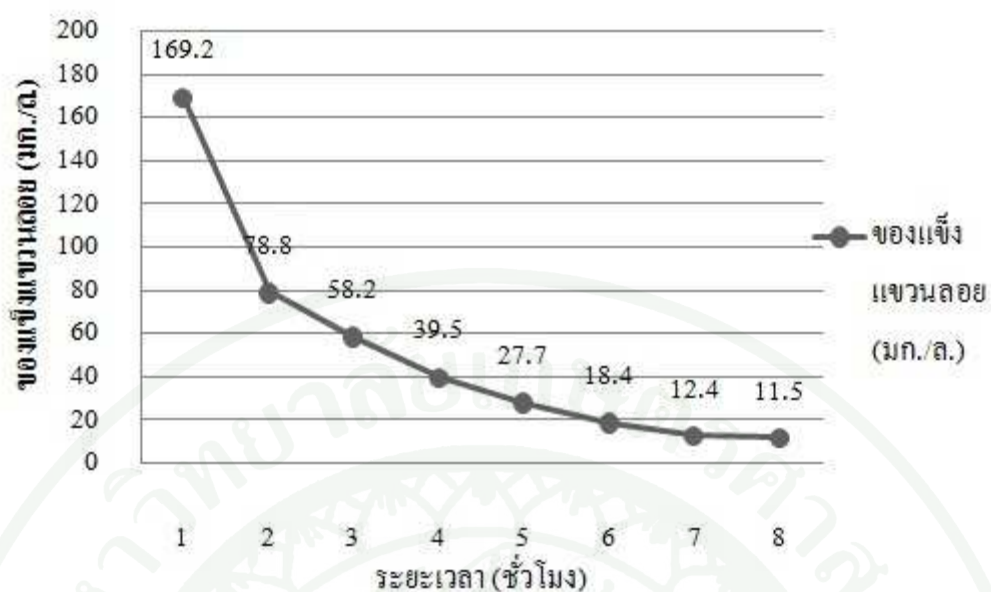
ตารางที่ 10 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	การดูดซับ อาร์เซนิกเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
6	ND	99.81	18.4	8.7	7.45
7	0.65	87.45	12.4	3.1	7.44
8	2.88	44.40	11.5	2.3	7.47

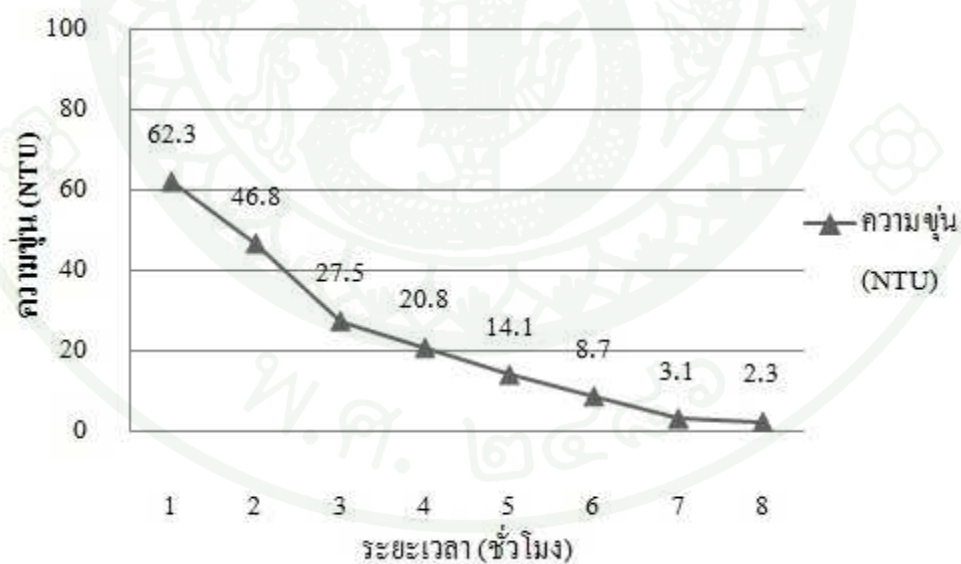
หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



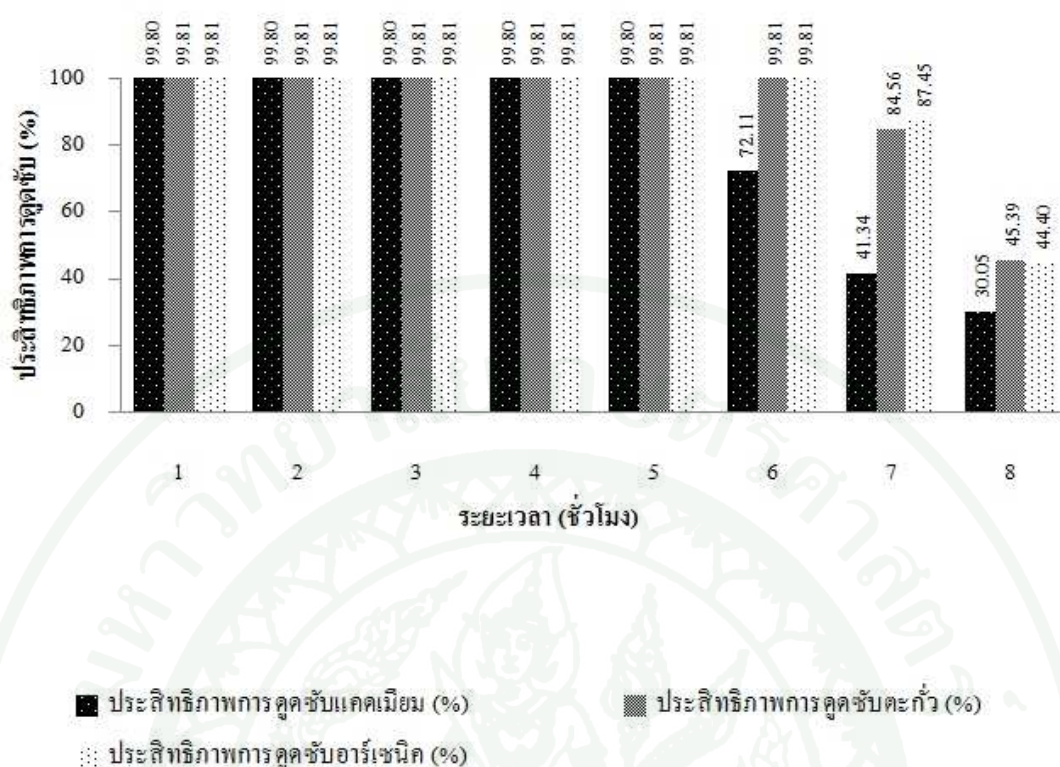
ภาพที่ 21 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแอดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 22 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 23 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 24 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุควบคุม 60 ซม.

3. ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

3.1 ประสิทธิภาพการควบคุมกรดเมียม

ประสิทธิภาพการควบคุมกรดเมียมในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุควบคุมถ้ำลอยและถ้ำกันเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการควบคุมกรดเมียมอยู่ในช่วง 21.35–99.80% ตามตารางที่ 11 และภาพที่ 25 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการควบคุมกรดเมียมจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

3.2 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 10.1–148.8 มก./ล. ตามตารางที่ 11 และภาพที่ 26 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

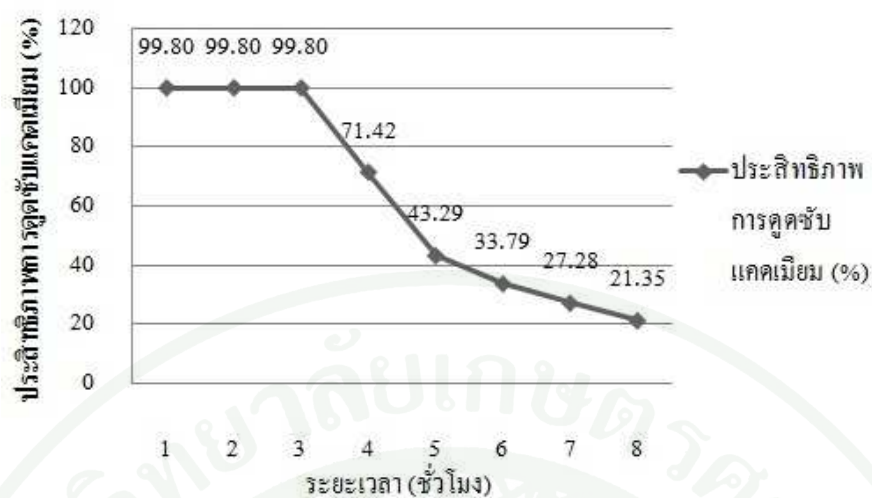
3.3 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.6–58.6 NTU ตามตารางที่ 11 และภาพที่ 27 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

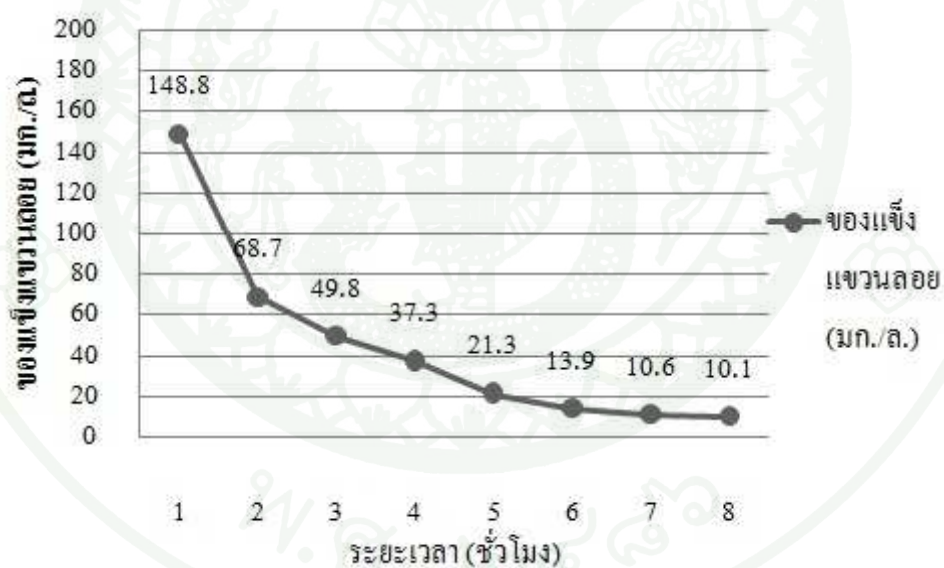
ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการดูดซับแคะเมียมเฉลี่ยที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคะเมียม เฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคะเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.12				2.42
1	ND	99.80	148.8	58.6	7.46
2	ND	99.80	68.7	42.4	7.45
3	ND	99.80	49.8	28.1	7.44
4	1.46	71.42	37.3	18.6	7.42
5	2.90	43.29	21.3	10.9	7.44
6	3.39	33.79	13.9	8.5	7.46
7	3.72	27.28	10.6	5.6	7.46
8	4.03	21.35	10.1	2.6	7.47

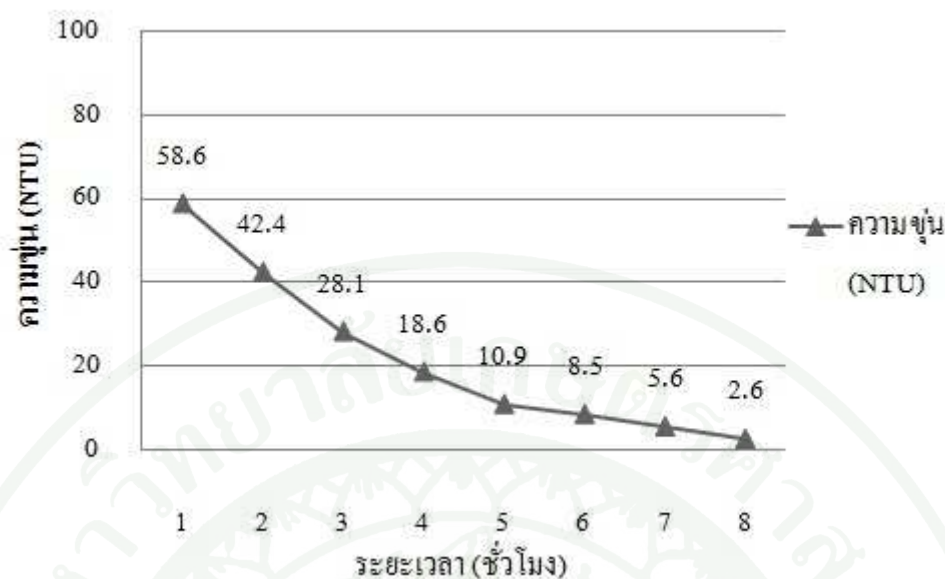
หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



ภาพที่ 25 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคลอรีที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 26 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำส้มฝิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 27 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราการน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

3.4 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว

ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่อัตราการน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับตะกั่วอยู่ในช่วง 31.37–99.80% ตามตารางที่ 12 และภาพที่ 28 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

3.5 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราการน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและถ้ำก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 10.5–153.2 มก./ล. ตามตารางที่ 12 และภาพที่ 29 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

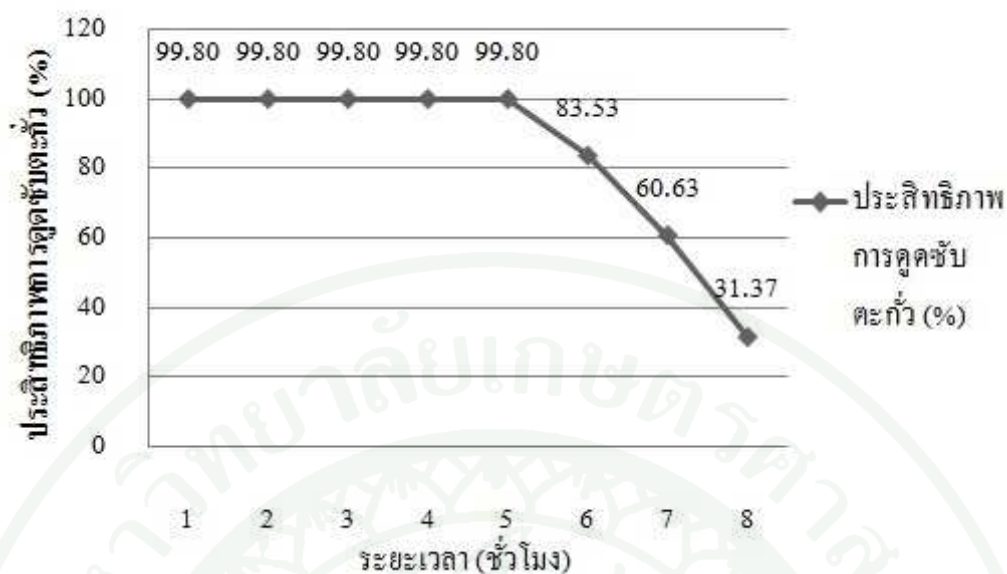
3.6 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำลอยและ ถ้ำกันเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.8–71.3 NTU ตาม ตารางที่ 12 และภาพที่ 30 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

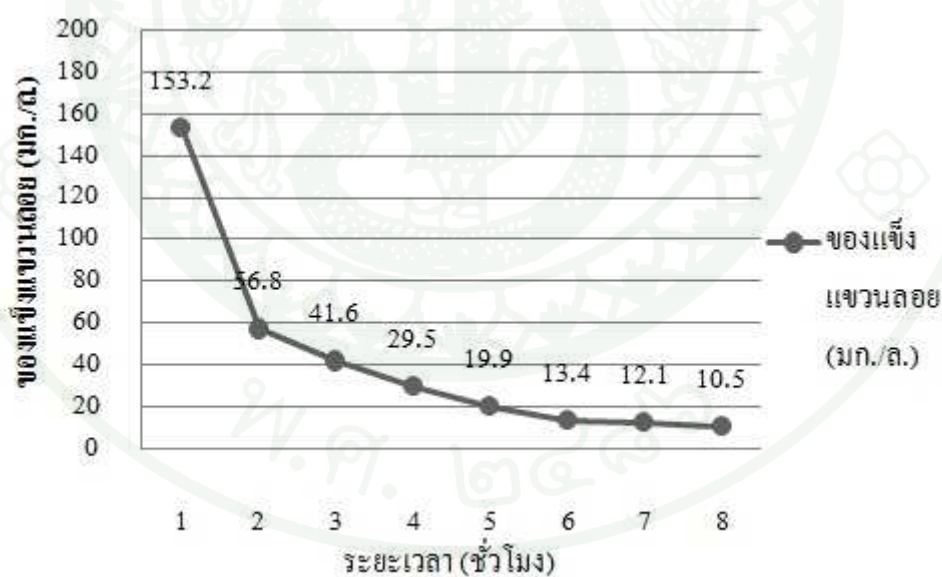
ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเฉลี่ยที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ ตะกั่วเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.48
1	ND	99.80	153.2	71.3	7.46
2	ND	99.80	56.8	40.4	7.48
3	ND	99.80	41.6	26.2	7.48
4	ND	99.80	29.5	16.1	7.49
5	ND	99.80	19.9	11.3	7.48
6	0.84	83.53	13.4	7.2	7.44
7	2.00	60.63	12.1	4.6	7.45
8	3.49	31.37	10.5	2.8	7.44

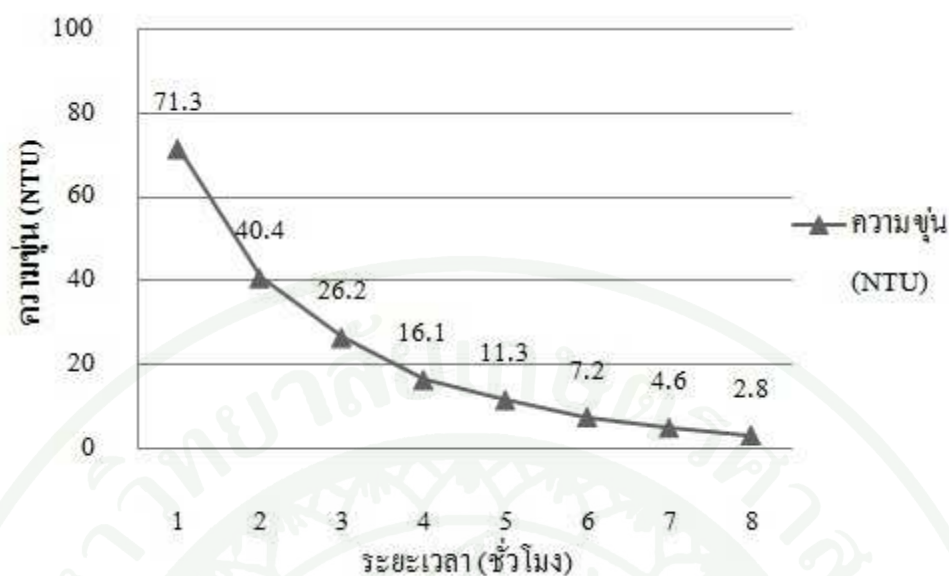
หมายเหตุ: Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01 ppm.)



ภาพที่ 28 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 29 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม. /ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 30 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุคูดซับ 60 ซม.

3.7 ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิก

ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุคูดซับถั่วลอยและถั่วกั้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการดูดซับอาร์เซนิกอยู่ในช่วง 37.49–99.81% ตามตารางที่ 13 และภาพที่ 31 โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

3.8 ของแข็งแขวนลอย

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุคูดซับถั่วลอยและถั่วกั้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.0–165.3 มก./ล. ตามตารางที่ 13 และภาพที่ 32 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

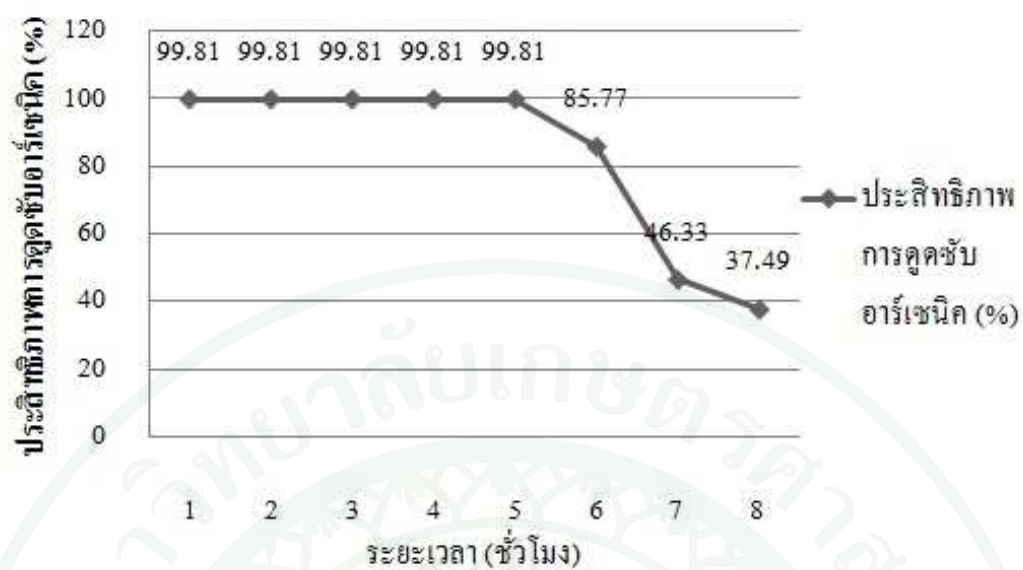
3.9 ความขุ่น

ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความขุ่นในช่วง 4.7–64.1 NTU ตามตารางที่ 13 และภาพที่ 33 โดยมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้น

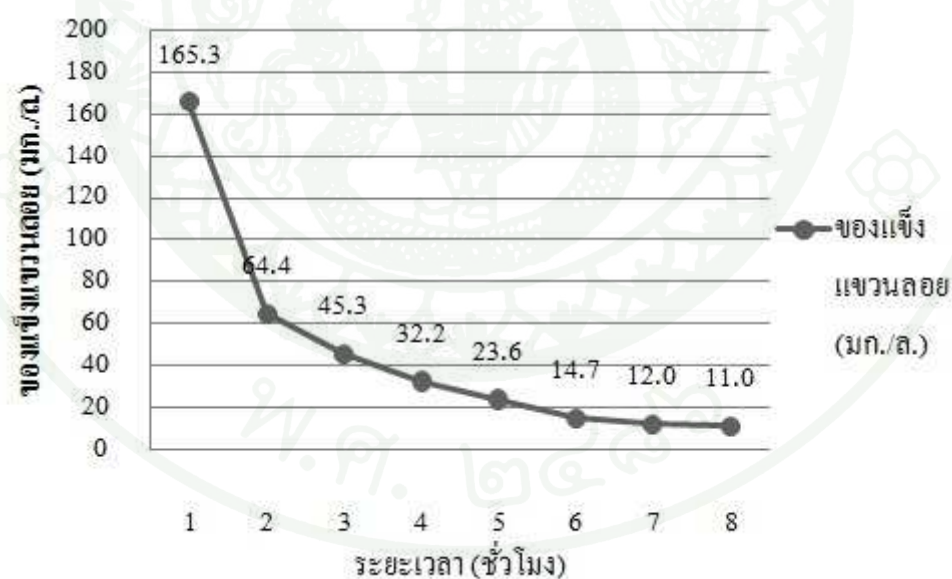
ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
วัสดุดูดซับ 60 ซม.

ชั่วโมงที่	การดูดซับ อาร์เซนิกเฉลี่ย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช เฉลี่ย
น้ำเข้าระบบ	5.13				2.43
1	ND	99.81	165.3	64.1	7.47
2	ND	99.81	64.4	40.6	7.46
3	ND	99.81	45.3	22.8	7.43
4	ND	99.81	32.2	17.8	7.47
5	ND	99.81	23.6	14.1	7.47
6	0.73	85.77	14.7	11.0	7.44
7	2.27	46.33	12.0	7.3	7.43
8	3.21	37.49	11.0	4.7	7.44

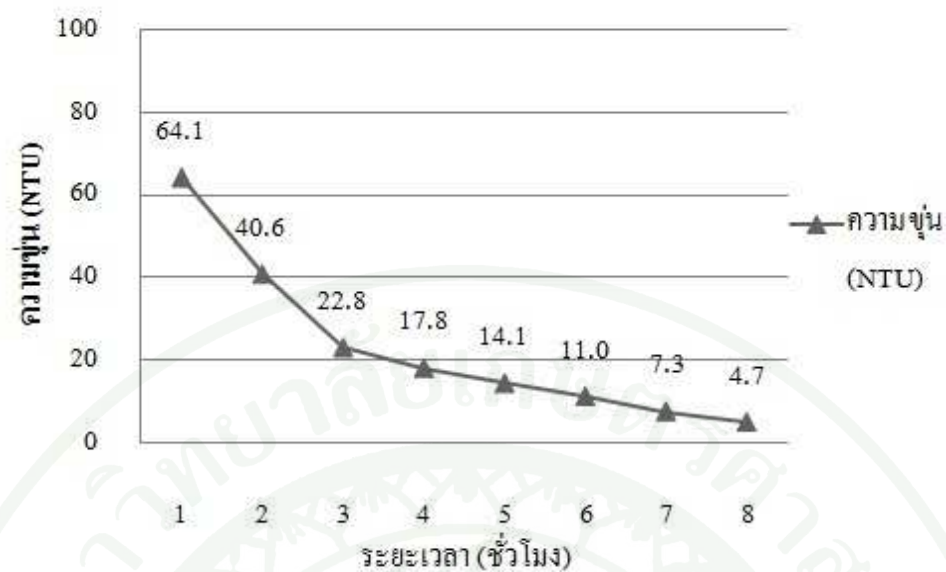
หมายเหตุ : Non Detection หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า ค่า Detection Limit ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Detection Limit = 0.01ppm.)



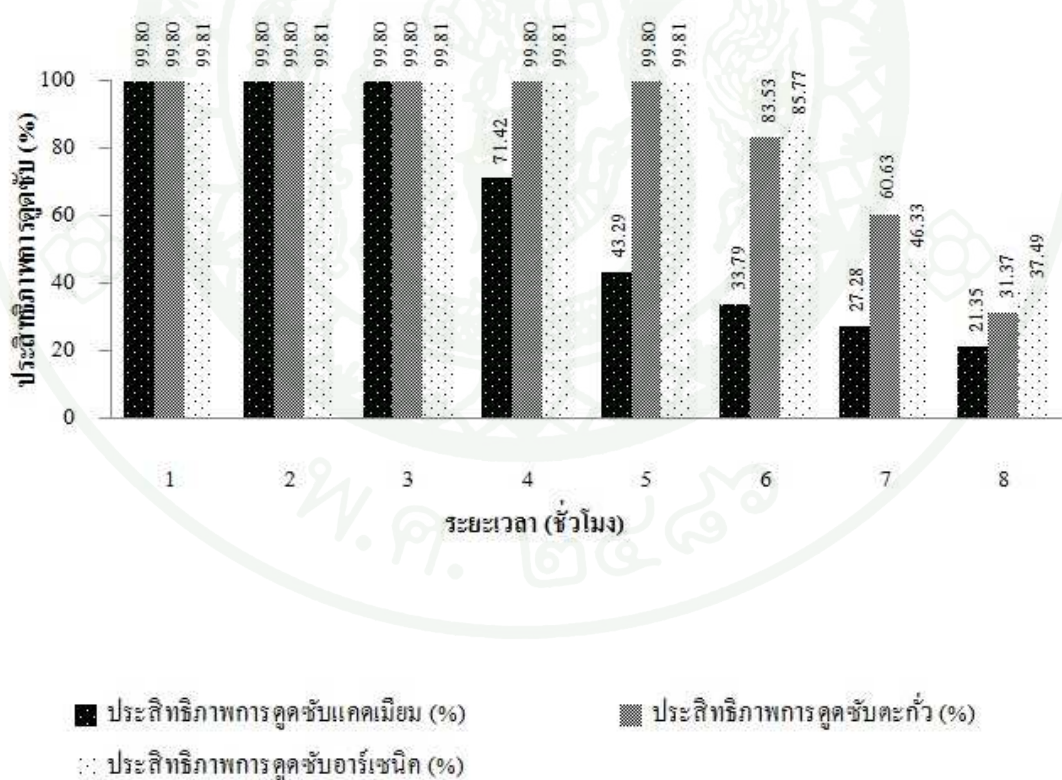
ภาพที่ 31 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 32 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุดูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 33 แสดงปริมาณความขุ่นที่อัตราการน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุคูดซับ 60 ซม.



ภาพที่ 34 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่อัตราการน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. วัสดุคูดซับ 60 ซม.

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว และอาร์เซนิก ที่ความสูง 60 ซม. ของวัสดุดูดซับถ้ำกันเตาและถ้ำลอยอัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก ที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ กัน คือ 0.4 0.5 และ 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. พบว่าที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 และ 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

2. จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.สามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและอาร์เซนิกได้มากกว่าร้อยละ 99 ในช่วง 7 ชั่วโมงแรก ส่วนการดูดซับแคดเมียมมีประสิทธิภาพการดูดซับได้มากกว่าร้อยละ 99 ในช่วง 6 ชั่วโมงแรก ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. สามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและอาร์เซนิกได้มากกว่าร้อยละ 99 ในช่วง 6 ชั่วโมงแรก ส่วนการดูดซับแคดเมียมมีประสิทธิภาพการดูดซับได้มากกว่าร้อยละ 99 ในช่วง 5 ชั่วโมงแรก และที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. สามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและอาร์เซนิกได้มากกว่าร้อยละ 99 ในช่วง 5 ชั่วโมงแรก ส่วนการดูดซับแคดเมียมมีประสิทธิภาพการดูดซับได้มากกว่าร้อยละ 99 ในช่วง 3 ชั่วโมงแรก

3. วัสดุดูดซับถ้ำกันเตาและถ้ำลอยที่อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก สามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดได้ โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดแตกต่างกันตามอัตราน้ำล้นผิว ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตัวอย่างมีเวลาสัมผัสในชั้นของถ้ำกันเตาและถ้ำลอยนานกว่า ทำให้มีโอกาสถูกดูดซับได้มากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของชั่วโมงแรกๆ จะสูงกว่าในชั่วโมงหลังๆ เพราะในระยะเวลาแรกๆ พื้นที่ผิวของถ้ำกันเตาและถ้ำลอยยังมีมาก แต่เมื่อน้ำตัวอย่างผ่านชั้นของถ้ำกันเตาและถ้ำลอยนานขึ้นพื้นที่ผิวจะลดลง เนื่องจากมีอนุภาคของโลหะหนักถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของถ้ำกันเตาและถ้ำลอยมากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวที่เหลือลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักลดลง

4. ของแข็งแขวนลอยและความขุ่นที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากตะกอนของถ้ำกันเตาและถ้ำลอยที่หลุดออกมาในทุกๆ อัตราน้ำล้นผิว ปริมาณของแข็งแขวนลอยและความขุ่น มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเดินระบบที่นานขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะช่องว่างระหว่างอนุภาคของถ้ำกันเตาและถ้ำลอยถูก

อุดตันด้วยโลหะหนัก ทำให้ช่องว่างของชั้นวัสดุคูดซับมีขนาดเล็กลง ในชั่วโมงหลังๆ จึงมีปริมาณของแข็งแขวนลอยและความขุ่นน้อยลง

5. ค่าพีเอชในตัวอย่างน้ำเสียที่บำบัดแล้วพบว่า ค่าพีเอชจะสูงกว่าค่าพีเอชก่อนบำบัด เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุคูดซับมีค่าพีเอชสูงกว่าตัวอย่างน้ำเสีย เมื่อตัวอย่างน้ำเสียสัมผัสกับวัสดุคูดซับจึงทำให้มีค่าพีเอชที่สูงขึ้น



ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองเดินระบบเป็นระยะเวลานานขึ้นจนกระทั่งประสิทธิภาพการดูดซับของถ้ำก้นเตาและถ้ำลอยแทบจะไม่ลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นหรือจนถ้ำก้นเตาและถ้ำลอยหมดอายุการใช้งาน
2. ทำการทดลองโดยเพิ่มความสูงของชั้นถ้ำก้นเตาและถ้ำลอย และเพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบในการดูดซับโลหะหนักให้เพิ่มมากขึ้น
3. ทำการทดลองโดยเพิ่มกระบวนการการกำจัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่น เพื่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. แคลเมียม. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2546. แนวทางการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปรอทในน้ำทะเลตะกอนดินและสัตว์น้ำ. ส่วนแหล่งน้ำทะเล สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน. แหล่งที่มา : <http://www.pcd.go.th>, 18 เมษายน 2555

กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2530. คู่มือการเก็บและรักษาตัวอย่างน้ำเพื่อการวิเคราะห์โลหะหนัก. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

กิจจา เกษปรีชาสวัสดิ์. 2554. การปรับปรุงคุณภาพถ้ำกันเกราโดยใช้ถ้ำลอยและเศษปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2534. วิศวกรรมการจัดการน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

จักรพงษ์ แสนชัย. 2548. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดุกกระตุ้นโดยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ขี้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฉัตรสินี สุรเสน. 2545. การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการกรองด้วยเปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นฤมิตร คินิมาน. 2538. การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำลอยลิคนิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิพนธ์ ลาคนอก. 2552. โอกาสในการปนเปื้อนทางสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้ถ้ำกันเตาในการปรับปรุง
คุณภาพชั้นปฐพี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์และ อุษา วิเศษสุนน. 2535. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่ง
ประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

การประปานครหลวง. 2549. มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง. แหล่งที่มา :
<http://www.mwa.co.th>, 18 เมษายน 2555

ประสงค์ อมรพานิชย์. 2545. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียมโดยการเติมผงถ่านกัมมันต์ใน
กระบวนการตะกอนเร่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ. 2545. การลดปริมาณโครเมียม (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้
ถ่านแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันทุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
กรุงเทพฯ.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมลักษณ์ นงนุช. 2543. การศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำใน
ภาคตะวันออกของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุดมรัตน์ สันติเกามชัย. 2550. การกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{6+}) ในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ
โดยใช้เปลือกไข่และเยื่อเปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุมาพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล. 2553. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้ถ้ำกันเตา เศษปูนขาว
และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อธิชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่าน
บ่อกักเก็บ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์. 2538. การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วย
ขี้เถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater**. 21 ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.

Bhargava, D.S., M.S. Gupta and B.S. Varshney. 1985. **Use of Sawdust for the Adsorption
of Heavy Metals**. Asian Environmental 1: 29-37.

Cheremisinoff, P.N. and F. Ellerduch. 1978. **Carbon Adsorption Handbook**. Ann Arbor
Science Publisher, Michigan.

Chizhikov, D.M. 1966. **Cadmium**. Pergamon Press Inc, New York. 135.

Dean, J.G., F.L. Bosqui and K.H. Lanouette. 1972. **Removing Heavy Metals from
Wastewater**. Envi Sci and Tech. 6 : 518-521.

Diamadopoulos, E., S. Loannidis and G.P. Sakellaropoulos. 1993. **As(V) removal from
aqueous solution by fly ash**. Wat. Res. 12: 1773-1777.

Eckenfelder, W.W. 1981. **International Application of Adsorption Wastewater Treatment
Conference**. Environment press, United State of America.

Eilbeck, W.J. and G. Mattock. 1987. **Chemical process in wastewater treatment**.
McGraw Hill Book, U.S.A.

Fassett, R.H. 1998. **Cadmium**. pp22-29 In Waldon A. (ed.). **Metal in the Environment**.
CRC press Inc., Cleveland.

Frederick. 1990. **Water quality and treatment**. 4th ed. McGraw – Hill, Inc., New York.

Konduru, R.R. and T. Viraraghavan. 1997. **Dye Removal Using Low Cost Adsorbents**.
Wat. Sci. Tech. 36(3):189-196.

Lee, I.P. 1983. **Effects of Environmental Metals on Man Reproduction**. Prentice Hall,
New York. : 253-273.

Panday, K.K., K.P. Yavada, B.S. Tyagi and V.N. Singh. 1987. **Fly Ash for the treatment
of Cd (II) Rich Effluents**. Envi. Tech. Letters. 8 : 225-234.

Parker, S.P. 1993. **McGraw-Hill Encyclopedia of Chemistry**. 2nd ed., McGraw-Hill Inc.,
New York, United State of America. 1236.

Sitting, M. 1980. **Priority Toxic Pollutants. Health Impacts and Allowable Limits**.
Noyes Data Corporation, New Jersey. 370 pp.

Tchbanoglous, G., F. L. Burton and H.D. Stensel. 1991. **Wastewater Engineering Treatment
Disposal and Reuse**. 3rd ed. McGraw-Hill, New York, United State of America.

Tiwari, R.K. 1993. **Managing Aqueous Solution Rich in Mn(II) – An Inexpensive
Technique**. Colloids and Surface a Physicochemical and Engineering Associs.
70 : 131-137.

Weber, W.J. 1972. **Physico-chemical Processes for Water Quality Control**. John Wiley &
Sons, Inc., Michigan.

Yavada, K.P. B.S Tyagi and V.N. Singh. 1989. **Fly ash for the treatment of water
enriched in lead (II)**. J.Envi. Sci. and Health. 7: 783-808.



ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.11				2.46
1	ND	99.80	169.5	76.4	7.52
2	ND	99.80	93.1	57.7	7.54
3	ND	99.80	78.7	24.8	7.49
4	ND	99.80	30.6	7.9	7.49
5	ND	99.80	15.2	7.8	7.46
6	ND	99.80	14.3	7.6	7.42
7	1.49	70.84	13.7	4.8	7.40
8	2.81	45.01	11.6	1.8	7.37

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.11				2.46
1	ND	99.80	182.0	73.9	7.51
2	ND	99.80	61.0	27.3	7.38
3	ND	99.80	58.1	26.9	7.55
4	ND	99.80	33.6	8.8	7.49
5	ND	99.80	18.2	2.7	7.49
6	ND	99.80	17.4	2.6	7.41
7	1.56	69.47	11.8	0.7	7.38
8	2.97	41.88	10.3	0.6	7.45

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.11				2.46
1	ND	99.80	172.6	74.8	7.42
2	ND	99.80	82.5	56.7	7.37
3	ND	99.80	54.7	32.9	7.43
4	ND	99.80	37.3	11.7	7.47
5	ND	99.80	21.2	9.7	7.48
6	ND	99.80	20.3	5.8	7.38
7	1.53	70.06	12.3	2.4	7.45
8	2.92	42.86	11.2	1.7	7.46

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.09				2.41
1	ND	99.80	144.3	76.6	7.43
2	ND	99.80	124.6	69.4	7.41
3	ND	99.80	88.7	48.2	7.38
4	ND	99.80	58.3	16.4	7.38
5	ND	99.80	37.1	6.8	7.44
6	ND	99.80	29.8	6.1	7.47
7	ND	99.80	13.4	3.1	7.43
8	0.61	88.02	10.6	1.7	7.44

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.09				2.41
1	ND	99.80	156.1	51.7	7.55
2	ND	99.80	79.4	29.9	7.49
3	ND	99.80	71.8	21.3	7.41
4	ND	99.80	23.8	11.7	7.40
5	ND	99.80	17.4	4.1	7.46
6	ND	99.80	15.3	3.5	7.50
7	ND	99.80	12.6	2.6	7.44
8	0.53	89.59	11.3	2.6	7.37

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.09				2.41
1	ND	99.80	186.3	70.3	7.38
2	ND	99.80	68.7	32.4	7.43
3	ND	99.80	52.5	27.4	7.47
4	ND	99.80	46.3	17.4	7.51
5	ND	99.80	22.7	9.8	7.46
6	ND	99.80	16.4	4.2	7.50
7	ND	99.80	14.4	3.6	7.49
8	0.64	87.43	10.2	2.7	7.43

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับ อาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.44
1	ND	99.81	188.7	71.0	7.48
2	ND	99.81	70.2	49.2	7.44
3	ND	99.81	31.5	19.4	7.48
4	ND	99.81	21.3	11.3	7.41
5	ND	99.81	16.8	4.6	7.48
6	ND	99.81	13.8	4.0	7.42
7	ND	99.81	10.5	3.9	7.38
8	0.52	89.96	11.3	1.8	7.46

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับ อาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.44
1	ND	99.81	164.8	89.7	7.53
2	ND	99.81	87.9	57.6	7.50
3	ND	99.81	64.1	21.4	7.46
4	ND	99.81	24.5	15.1	7.43
5	ND	99.81	18.4	9.7	7.39
6	ND	99.81	13.4	7.2	7.42
7	ND	99.81	11.6	3.9	7.46
8	0.61	88.22	10.4	0.9	7.38

ตารางผนวกที่ 9 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความ ขุ่น (NTU)	ค่าพี เอช
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.44
1	ND	99.81	175.6	59.6	7.46
2	ND	99.81	116.1	36.7	7.48
3	ND	99.81	59.2	28.0	7.43
4	ND	99.81	32.2	16.9	7.38
5	ND	99.81	25.7	14.3	7.39
6	ND	99.81	15.6	4.7	7.45
7	ND	99.81	14.7	3.8	7.48
8	0.58	88.80	12.4	2.6	7.44

ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ แคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.43
1	ND	99.80	146.7	50.3	7.48
2	ND	99.80	62.0	34.7	7.50
3	ND	99.80	58.7	24.7	7.47
4	ND	99.80	31.7	12.3	7.46
5	ND	99.80	16.4	9.7	7.46
6	1.43	71.85	13.8	7.2	7.43
7	2.87	43.50	11.3	2.4	7.41
8	3.47	31.69	10.9	1.7	7.38

ตารางผนวกที่ 11 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.43
1	ND	99.80	169.4	63.9	7.4
2	ND	99.80	71.7	48.2	7.48
3	ND	99.80	59.1	22.4	7.43
4	ND	99.80	46.3	18.8	7.49
5	ND	99.80	27.8	13.1	7.48
6	1.37	73.03	11.4	2.0	7.45
7	2.94	42.13	11.0	1.6	7.38
8	3.53	30.51	10.6	1.4	7.42

ตารางผนวกที่ 12 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับ แคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.43
1	ND	99.80	145.2	57.2	7.49
2	ND	99.80	73.6	41.3	7.45
3	ND	99.80	56.3	28.1	7.43
4	ND	99.80	38.6	20.6	7.46
5	ND	99.80	28.1	13.2	7.38
6	1.45	71.46	16.7	6.3	7.41
7	3.13	38.39	13.6	3.8	7.42
8	3.66	27.95	12.2	2.9	7.39

ตารางผนวกที่ 13 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.14				2.48
1	ND	99.81	178.1	65.8	7.36
2	ND	99.81	81.1	41.2	7.41
3	ND	99.81	60.8	27.1	7.49
4	ND	99.81	42.0	14.5	7.42
5	ND	99.81	36.7	11.7	7.46
6	ND	99.81	23.8	8.8	7.47
7	0.81	84.24	16.5	6.1	7.49
8	2.83	44.94	13.4	3.5	7.54

ตารางผนวกที่ 14 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.14				2.48
1	ND	99.81	157.6	53.4	7.48
2	ND	99.81	76.9	41.9	7.50
3	ND	99.81	49.9	27.5	7.43
4	ND	99.81	42.8	14.6	7.42
5	ND	99.81	18.5	10.3	7.42
6	ND	99.81	15.6	4.0	7.43
7	0.81	84.24	11.3	2.1	7.41
8	2.83	44.94	11.0	1.6	7.42

ตารางผนวกที่ 15 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.14				2.48
1	ND	99.81	157.2	49.6	7.46
2	ND	99.81	61.8	32.8	7.43
3	ND	99.81	59.9	24.5	7.49
4	ND	99.81	45.8	18.4	7.45
5	ND	99.81	20.1	13.6	7.43
6	ND	99.81	13.7	5.1	7.38
7	0.76	85.21	10.4	2.9	7.42
8	2.76	46.30	9.0	0.7	7.41

ตารางผนวกที่ 16 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.46
1	ND	99.81	151.6	58.7	7.51
2	ND	99.81	72.1	47.1	7.48
3	ND	99.81	59.0	22.4	7.49
4	ND	99.81	32.8	14.4	7.47
5	ND	99.81	23.2	13.3	7.44
6	ND	99.81	16.7	4.2	7.41
7	0.68	86.87	12.8	3.6	7.39
8	2.87	44.59	11.9	2.8	7.43

ตารางผนวกที่ 17 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.46
1	ND	99.81	173.4	61.6	7.46
2	ND	99.81	86.5	53.7	7.41
3	ND	99.81	54.6	29.8	7.43
4	ND	99.81	37.2	19.6	7.46
5	ND	99.81	23.3	14.5	7.44
6	ND	99.81	17.4	9.7	7.47
7	0.59	88.61	12.8	3.1	7.50
8	2.86	44.79	11.7	2.4	7.51

ตารางผนวกที่ 18 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.18				2.46
1	ND	99.81	182.6	66.5	7.45
2	ND	99.81	77.8	39.6	7.39
3	ND	99.81	61.1	30.2	7.40
4	ND	99.81	48.4	28.4	7.46
5	ND	99.81	36.7	14.4	7.47
6	ND	99.81	21.2	12.1	7.48
7	0.68	86.87	11.7	2.7	7.43
8	2.91	43.82	10.9	1.6	7.47

ตารางผนวกที่ 19 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับแคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.12				2.42
1	ND	99.80	157.8	59.1	7.42
2	ND	99.80	62.3	36.4	7.41
3	ND	99.80	45.2	19.8	7.45
4	1.47	71.29	31.8	13.2	7.39
5	2.87	43.95	20.4	9.3	7.46
6	3.33	34.96	14.6	8.1	7.50
7	3.86	24.61	10.1	4.4	7.48
8	4.21	17.77	9.8	2.1	7.49

ตารางผนวกที่ 20 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับแคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.12				2.42
1	ND	99.80	141.0	62.1	7.45
2	ND	99.80	76.8	43.8	7.48
3	ND	99.80	51.7	30.3	7.44
4	1.42	72.27	39.4	21.1	7.46
5	2.93	42.77	26.5	14.6	7.47
6	3.41	33.40	15.6	10.7	7.42
7	3.63	29.10	11.2	6.2	7.43
8	3.90	23.83	11.0	3.3	7.48

ตารางผนวกที่ 21 ผลการทดลองการดูดซับแคดเมียมที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับแคดเมียม (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม (%)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.12				2.42
1	ND	99.80	147.7	54.7	7.51
2	ND	99.80	66.9	46.9	7.47
3	ND	99.80	52.6	34.3	7.42
4	1.50	70.70	40.7	21.4	7.41
5	2.91	43.16	17.0	8.9	7.39
6	3.43	33.01	11.4	6.7	7.46
7	3.68	28.13	10.6	6.1	7.47
8	3.97	22.46	9.4	2.4	7.45

ตารางผนวกที่ 22 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.48
1	ND	99.80	142.6	58.7	7.48
2	ND	99.80	56.7	39.2	7.47
3	ND	99.80	41.2	20.3	7.48
4	ND	99.80	32.6	16.6	7.51
5	ND	99.80	16.5	10.7	7.46
6	0.83	83.66	12.4	6.4	7.44
7	1.9	62.60	10.8	4.8	7.48
8	3.48	31.50	10.2	3.6	7.45

ตารางผนวกที่ 23 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.48
1	ND	99.80	163.3	82.4	7.43
2	ND	99.80	54.8	40.8	7.46
3	ND	99.80	36.6	28.7	7.47
4	ND	99.80	23.5	16.2	7.48
5	ND	99.80	16.7	11.4	7.48
6	0.85	83.27	13.2	8.3	7.41
7	1.97	61.22	11.9	5.7	7.43
8	3.46	31.89	10.3	3.1	7.42

ตารางผนวกที่ 24 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับตะกั่ว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับตะกั่ว (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.08				2.48
1	ND	99.80	153.7	72.7	7.46
2	ND	99.80	59.0	41.2	7.52
3	ND	99.80	46.9	29.6	7.50
4	ND	99.80	32.5	15.5	7.48
5	ND	99.80	26.5	11.8	7.49
6	0.83	83.66	14.7	6.9	7.47
7	2.13	58.07	13.5	3.4	7.44
8	3.52	30.71	11.1	1.8	7.46

ตารางผนวกที่ 25 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 1

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.13				2.43
1	ND	99.81	160.3	64.7	7.47
2	ND	99.81	52.6	35.8	7.43
3	ND	99.81	35.1	17.7	7.41
4	ND	99.81	28.2	15.2	7.45
5	ND	99.81	19.4	13.4	7.47
6	0.69	86.55	12.7	9.6	7.43
7	2.83	44.83	11.3	4.1	7.39
8	3.43	33.14	11.2	2.3	7.39

ตารางผนวกที่ 26 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 2

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.13				2.43
1	ND	99.81	172.6	68.2	7.45
2	ND	99.81	69.2	47.6	7.48
3	ND	99.81	48.2	22.4	7.44
4	ND	99.81	32.2	19.5	7.47
5	ND	99.81	24.4	14.9	7.46
6	0.77	84.99	16.0	11.6	7.48
7	2.68	47.76	12.4	9.3	7.50
8	3.11	39.38	11.7	6.2	7.49

ตารางผนวกที่ 27 ผลการทดลองการดูดซับอาร์เซนิกที่อัตราน้ำล้นผิว 0.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทดลองครั้งที่ 3

ชั่วโมงที่	การดูดซับอาร์เซนิก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับอาร์เซนิก (%)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ความขุ่น (NTU)	ค่าพีเอช
น้ำเข้าระบบ	5.13				2.43
1	ND	99.81	162.9	59.3	7.50
2	ND	99.81	71.3	38.4	7.46
3	ND	99.81	52.7	28.2	7.44
4	ND	99.81	36.2	18.7	7.48
5	ND	99.81	27.1	14.1	7.49
6	0.73	85.77	15.3	11.7	7.41
7	2.75	46.39	12.4	8.4	7.39
8	3.08	39.96	10.1	5.6	7.43

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววราลี วีระศิลป์ชัย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2526
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

