ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม | วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี

Adsorption of Sulfide Ion in Wastewater by Sludge in the Lagoon Treatment System from Suphanburi and Phetchaburi Municipal

นามผู้วิจัย นางสาวสุนิดา ทองโท

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์พิลาณี ไวฒนอมสัตย์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา .....

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี

Adsorption of Sulfide Ion in Wastewater by Sludge in the Lagoon Treatment System from Suphanburi and Phetchaburi Municipal

โดย

นางสาวสุนิดา ทองโท

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2551

สุนิดา ทองโท 2551: การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, Ph.D. 106 หน้า

ซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับจากผงสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี ถูกตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้ารวมซิลเวอร์ซัลไฟด์ ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาปั่นกวน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน และปริมาณของตัวดูดซับ นอกจากนี้กระบวนการดูดซับของสลัดจ์จากระบบบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดิช ตามลำดับ จากสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี

_____ _____ ___/___/___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sunida Thongtho 2008: Adsorption of Sulfide Ion in Wastewater by Sludge in the Lagoon Treatment System from Suphanburi and Phetchaburi Municipal.
Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D.
106 pages.

The remained sulfide ion after its adsorptive extraction from Suphanburi and Phetchaburi Municipality treatment plants sludges powder can be determinated by measurement with a Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode. The effects of pH, shaking time or digestion time, contact time, concentration of sulfide ion and amount of adsorbent are reported. In addition, the adsorption process of Suphanburi and Phetchaburi sludges powder are conformed with Langmuir and Freundlich behavior respectively. The system has been applied to the determination of Sulfide Ion in wastewater from Phetchaburi sewage system.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้ด้วยความอนุเคราะห์จากคณาจารย์หลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พิลาณี ไวถนอมสัตย์ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่เทศบาลเมืองเพชรบุรีที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจริงจากท่อระบายน้ำเสีย และขอขอบคุณ คุณภทรมน โสกันธิกา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อถวิลศักดิ์ ทองโท และคุณแม่อาภา ทองโท ที่คอยสนับสนุนเรื่องการศึกษา รวมทั้งกำลังใจ และความห่วงใยที่มีให้มาโดยตลอด รวมถึงขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจในการศึกษาวิจัยทดลอง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุนิดา ทองโท

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	51
ผล	51
วิจารณ์	81
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	90
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี	23
2	ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ	37
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์	69
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์	71
5	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี ภายหลังการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	74
6	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ภายหลังการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	76
7	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์จากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี ของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	79
8	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์จากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี ของสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	80

ตารางผนวกที่

1	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน โดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	91
2	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน โดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
3	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี	92
4	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	92
5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	93
6	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	93
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน	94
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน	94
9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	95
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	95
11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	96
12	ไอโซเทอร์มการดูดซับของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	96
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์	97
15	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรีโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	98
16	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรีโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	98
17	ความสัมพันธ์การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสม จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	99
18	ความสัมพันธ์การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสม จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	99
19	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	100
20	การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	101
21	แสดงคุณภาพของน้ำเสียจากน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี	102
22	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD	103
23	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD	103
24	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD	104
25	แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี LSD	104
26	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสลัดจ์ทางสถิติโดยวิธี LSD	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซัลไฟด์	15
2	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	18
3	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	22
4	ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ	22
5	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	26
6	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	27
7	กราฟความชันระหว่าง log q และ log C	29
8	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดิช	30
9	กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ	30
10	ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m	31
11	กราฟแสดงความชันระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$	32
12	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง	33
13	ลักษณะการกระจายตัวของประจุบวกและประจุลบบนอนุภาคดิน	39
14	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	52
15	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	54
17	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	55
18	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	56
19	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	57
20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน	58
21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน	59
22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	60
23	ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	62
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี	63
25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	65
26	ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	67
28	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลืออยู่	69
29	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือและปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์	70
30	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลืออยู่	72
31	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือและปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์	72
32	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี และการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์	74
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์	75
34	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรีกับความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	77
35	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี กับความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

EPA	=	Environmental Protection Agency
BOD	=	Biochemical oxygen demand
COD	=	Chemical oxygen demand
LSD	=	Least Significant Different
TSS	=	Total suspended solid
TDS	=	Total dissolved solid

การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี

Adsorption of Sulfide Ion in Wastewater by Sludge in the Lagoon Treatment System from Suphanburi and Phetchaburi Municipal

คำนำ

ปัจจุบันมีการใช้น้ำเพื่อกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันและกิจกรรมของชุมชนมากขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของประชากร ทำให้ปริมาณน้ำเสียที่ถูกปล่อยทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ ถูกระบายทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ เนื่องจากการปนเปื้อนสารมลพิษ ปัญหามลพิษทางน้ำจัดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่ง ดังนั้นปัญหาน้ำเสียจึงจัดเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์โดยตรง

ซัลเฟอร์พบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติในรูปของซัลไฟด์ (Sulfides) เช่น HS^-, $Na_2S_2O_3$ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเน่าเสียของน้ำ มีกลิ่นเหม็น คล้ายแก๊สไข่เน่า เกิดจากการย่อยสลายของแบคทีเรีย และการปล่อยน้ำเสียจากกิจกรรมของชุมชน และอุตสาหกรรมต่างๆ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีผลเสียต่อสุขภาพ เพราะทำให้เกิดอาการระคายเคือง และคลื่นไส้ เราจะได้กลิ่นเมื่อมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตั้งแต่ 0.05-0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นไป

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียหลังจากการบำบัดแล้ว ยังมีประโยชน์อีกมากมาย เช่น การนำไปถมที่ นำไปฝังกลบขยะมูลฝอย ปลูกต้นไม้ เป็นต้น หากสามารถพัฒนาวิธีการบำบัดซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย สามารถใช้สลัดจ์ให้เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นใช้ต้นทุนต่ำกว่าก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากสลัดจ์ เพื่อให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนดิน ดังนั้นจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการนำสลัดจ์ มาใช้ในดูดซับซัลไฟด์ไอออน และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากสลัดจ์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี

2. เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี

3. เพื่อนำสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี ที่ได้จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี

การตรวจเอกสาร

1. ที่มาและปัญหาของธาตุซัลเฟอร์

1.1 สาเหตุของการเกิดซัลไฟด์ในน้ำเสีย

ซัลเฟอร์ จะพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติในรูปของซัลเฟต ได้แก่ $CaSO_4$,$MgSO_4$ และ Na_2SO_4 เป็นต้น และรูปของซัลไฟด์ ได้แก่ H_2S , HS^- , $Na_2S_2O_3$ เป็นต้น ในน้ำประปาทั่วไปถ้ามีซัลเฟตมากเกินไปคือมีมากถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจทำให้ผู้ดื่มท้องเดินได้ ถ้าร่างกายยังไม่เคยชินกับน้ำประปาที่มีซัลเฟตสูง ซัลเฟตยังสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนต่อโครงสร้างคอนกรีตหรือแม้กระทั่งท่อซีเมนต์ใยหิน โดยพบว่ามีซัลเฟตเพียง 350 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อน และถ้ามีซัลเฟตสูงถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นไป จะมีผลต่อการกัดกร่อนอย่างมาก จากมาตรฐานน้ำดื่มของ EPA (environmental protection agency) ได้กำหนดไว้ที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และขององค์การอนามัยโลก ได้กำหนดไว้ว่าควรมีค่าซัลเฟตไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำประปา และยอมให้มีซัลเฟตได้สูงสุดเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซัลเฟตไอออนพบในแหล่งน้ำธรรมชาติต่างๆ แต่ถ้าคนเราบริโภคน้ำที่มีซัลเฟตมากเกินไป มักจะมีผลคล้ายกับยาถ่าย ด้วยเหตุนี้เราจึงกำหนดมาตรฐานน้ำดื่มไว้ที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนั้นมันจะทำให้ได้น้ำกระด้างถาวร ซึ่งจะก่อตะกรันในหม้อต้มได้อีกด้วย

1.2 วัฏจักรซัลเฟอร์

ดวงพร (2545) กล่าวว่า ซัลเฟอร์หรือกำมะถัน เป็นธาตุที่มีปริมาณมากภายในโลก ซัลเฟอร์มีค่าเลขออกซิเดชันอยู่ระหว่าง -2 ถึง +6 ไม่ว่าจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และจากปฏิกิริยาการออกซิไดส์ และรีดิวซ์ โดยจุลินทรีย์เป็นตัวกลางทำให้เกิดการเปลี่ยนของค่าเลขออกซิเดชันระหว่าง -2 ถึง +6 ของธาตุซัลเฟอร์ภายในสารประกอบต่างๆ ก่อให้เกิดวัฏจักรซัลเฟอร์ จุลินทรีย์สามารถกำจัดซัลเฟอร์ออกจากสารอินทรีย์ ถ้าหากเป็นสภาวะมีอากาศการกำจัดซัลเฟอร์ (desulfurization) ออกจากสารอินทรีย์ทำให้เกิดซัลเฟต แต่ถ้าเป็นสภาวะไร้อากาศได้แก๊สไข่เน่า (H_2S) แก๊สไข่เน่าอาจเกิดจากแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต (SO_4^{2-}) คือ ใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนใน

การหายใจแบบไร้อากาศ การสะสมแก๊สชนิดนี้มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะได้เป็นโลหะซัลไฟด์อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ

การออกซิไดส์ซัลเฟอร์ แบคทีเรียที่สามารถออกซิไดส์ก๊าซไข่เน่าเพื่อสร้างพลังงาน ได้แก่ *Beggiatoa* และ *Thiotrix* เป็นแบคทีเรียที่มีลักษณะฟิลาเมนตัส ชอบอากาศเล็กน้อย สามารถออกซิไดส์ H_2S ดังสมการ

$$2H_2S + O_2 \longrightarrow 2S + 2H_2O$$

ซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นสะสมไว้ภายในเซลล์ ในสภาวะที่ขาดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซัลเฟอร์ถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นซัลเฟต ถูกแบคทีเรียบางชนิดของ *T.denitrificans* สามารถใช้ไนเตรตไอออนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการออกซิไดส์อนินทรีย์ซัลเฟอร์ ดังตัวอย่าง

$$4NO_3^- + 3S^0 \longrightarrow 3SO_4^{2-} + 2N_2$$

แบคทีเรียที่ออกซิไดส์ซัลเฟอร์กลุ่มคีโมออกโตโทรฟ สามารถพบได้ทั่วไปทั้งในพื้นดินและแหล่งน้ำ ส่วนพวกเฮเทอโรโทรฟการออกซิไดส์อนินทรีย์ซัลเฟอร์ไปเป็นซัลเฟตหรือไธโอซัลเฟต ($S_2O_3^{2-}$) ไม่พบว่าได้พลังงานจากปฏิกิริยานี้ นอกจากนี้ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังถูกใช้โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสง กลุ่ม chromatiaceae chlorobiaceae ในสภาวะไร้อากาศแบคทีเรียเหล่านี้รีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่มันออกซิไดส์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปเป็น S^0 ซึ่งแตกต่างจากการสังเคราะห์แสงของพวกยูคาริโอต ดังสมการ

$$CO_2 + H_2S \longrightarrow (CH_2O) + S$$
$$CO_2 + H_2O \longrightarrow (CH_2O) + O_2$$

การรีดิวซ์ซัลเฟตมีแบคทีเรียหลายชนิดที่สามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการหายใจแบบไร้อากาศ การใช้ซัลเฟตในการหายใจเป็นการรีดิวซ์ซัลเฟตแบบสลาย (dissimilatory sulfate reduction) และแบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญในสภาพไร้อากาศเท่านั้น เรียกว่า แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (sulfate reducing bacteria) ได้แก่ *Desulfovibrio Deulfotomaculum* และ *Desulfomonas* ผลการรีดิวซ์ซัลเฟตทำให้เกิดแก๊สไข่เน่า ดังสมการ

$$4H_2 + SO_4^{2-} \longrightarrow H_2S + 2H_2O + 2OH^-$$

นอกจากแบคทีเรียกลุ่มที่กล่าวมา แบคทีเรียบางชนิด เช่น *Bacillus* *Pseudomonas* และ *Saccharomyces* ทำให้เกิดแก๊สไข่เน่าจากซัลเฟตได้ แต่มีบทบาทน้อยมากในปฏิกิริยาแบบนี้ การรีดิวซ์ซัลเฟต และเกลือของซัลเฟต เกิดได้ในช่วงพีเอชที่กว้าง รวมถึงปัจจัยความดัน และอุณหภูมิ ปัจจัยที่จำกัดการเกิด คือ สารที่จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนสำหรับการรีดิวซ์ซัลเฟต ส่วนใหญ่ตัวให้อิเล็กตรอน คือ ไพรูเวต แลคเตต และแก๊สไฮโดรเจน การรีดิวซ์ซัลเฟตถูกยับยั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน ไนเตรต หรือเหล็ก(III)ไอออน และการแข่งขันระหว่างพวกแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟตกับเมทาโนจีนิกแบคทีเรีย เพื่อใช้ตัวอิเล็กตรอน ภายในโคลน ตะกอน การเกิดเมทาโนจีซิสอยู่ส่วนล่างบริเวณที่มีซัลเฟต อัตราการรีดิวซ์ซัลเฟตบ่อยครั้งที่แหล่งคาร์บอนเป็นสารจำกัดอัตราการเกิดสารอินทรีย์ในตะกอน จึงเป็นตัวเร่งอัตราการรีดิวซ์ซัลเฟตแบบสลาย (ดวงพร, 2545)

1.3 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับซัลไฟด์ไอออน

1.3.1 การเกิดซัลไฟด์ในท่อน้ำเสีย

การเกิดซัลไฟด์เป็นกระบวนการที่เกิดจากแบคทีเรียเป็นตัวกลาง พบในท่อน้ำเสียส่วนที่จมอยู่ในน้ำ น้ำเสียชุมชนใหม่ๆ ที่เข้าสู่ระบบรวบรวมน้ำเสียมีซัลไฟด์อิสระเสมอ อย่างไรก็ตามรูปที่ละลายได้ของซัลไฟด์มักพบว่าเป็นผลมาจากสภาวะดังต่อไปนี้

สภาวะที่ 1 ปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ

สภาวะที่ 2 ระยะเวลาเก็บกักนานในระบบรวบรวม

สภาวะที่ 3 อุณหภูมิของน้ำเสียที่สูงขึ้น

สาเหตุหลักของกลิ่นและการกัดกร่อนในระบบรวบรวมมาจากซัลไฟด์ ซึ่งถูกผลิตจากซัลเฟตโดยแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในชั้นเมือก (slime layer) บนผิวของโครงสร้างและท่อน้ำเสียส่วนที่จมอยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถถูกปล่อยออกจากน้ำเสียได้ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อมาแบคทีเรียที่ผนังท่อส่วนที่ไม่จมน้ำด้านบนใช้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปผลิตกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นสาเหตุของการทำลายโครงสร้างของท่อน้ำเสีย และอุปกรณ์อื่นๆ การทำลายโดยกรดซัลฟิวริค ทำ

ให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการดำเนินการและบำรุงรักษา ซึ่งความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นได้แก่ ท่อน้ำเสียแตก ความล้มเหลวของระบบท่อ และไม่สามารถควบคุมการปล่อยน้ำเสียได้

1.3.2 รูปแบบของซัลไฟด์

ซัลไฟด์ที่ถูกปล่อยกลับเข้าสู่การไหลของน้ำเสีย ทำให้เกิดสมดุลเคมีที่ไม่คงที่ระหว่างซัลไฟด์ 4 รูปแบบ คือ ซัลไฟด์ไอออน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปของสารละลาย $H_2S(aq)$ และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ $H_2S(g)$

ก) ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-})

ซัลไฟด์ไอออน ไม่มีสีในสารละลาย และไม่สามารถปล่อยออกจากน้ำเสียได้ในรูปนี้ และไม่มีกลิ่น

ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน (HS^-)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออนสามารถจะรับโปรตอนจากกรดได้ เป็นเหตุให้ประจุลบหนึ่งของซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออนไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถคงอยู่ได้ในสารละลายโดยไม่ทำให้เกิดกลิ่น

ค) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปของสารละลาย

ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถคงอยู่เป็นแก๊สที่ละลายในน้ำได้ในรูปของของเหลวไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไม่เป็นเหตุให้เกิดกลิ่น อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปของของเหลวเป็นเพียงซัลไฟด์ สปีชีส์ ซึ่งสามารถออกจากเฟสของสารละลายไปอยู่เป็นแก๊สอิสระ อัตราที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากเฟสของสารละลายถูกควบคุมโดยกฎของเฮนรี (Henry's Law) คือ จำนวนความปั่นป่วนของน้ำเสีย และ พีเอชของสารละลาย

ง) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปแก๊ส

เมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากเฟสที่ละลายน้ำ และเข้าสู่เฟสที่เป็นแก๊ส จะสามารถทำให้เกิดกลิ่น และกัดกร่อนได้ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่มีสีแต่เป็นแก๊สที่มีกลิ่นรุนแรง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยประสาทรับกลิ่นของมนุษย์ในความเข้มข้นต่ำมาก ในความเข้มข้นสูงเป็นอันตรายมากต่อมนุษย์ ในความเข้มข้นต่ำ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสาเหตุให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดหัว และระคายเคือง ปริมาณมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจและประสาทรับกลิ่น เมื่อได้รับเป็นเวลานานๆ อาจจะทำลายทางเดินหายใจและตา ปริมาณมากกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ตายภายใน 2-3 นาที occupational safety and health administration (OSHA) ได้กำหนดระยะเวลาที่มนุษย์สามารถสูดดมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเวลา 8 ชั่วโมง แม้ว่าซัลไฟด์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในน้ำเสีย แต่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดยาก เมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์กลับเข้าไปอยู่ในเฟสของสารละลายซัลไฟด์อย่างต่อเนื่องโดยชั้นเมือก นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังถูกปลดปล่อยกระจายอยู่ทั่วน้ำเสีย และไม่มีความเข้มข้นสูงพอที่จะผลักดันให้กลับเข้าไปในสารละลายได้

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากการย่อยสลายซากของสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนบางชนิด เช่น ซิสเตอีน เมทไธโอนีน ซีสติน รวมทั้งวิตามิน และโคเอนไซม์บางชนิด (Funchel and Blackbun, 1979) กรดอะมิโนที่กล่าวข้างต้น เป็นกรดอะมิโนที่พบมากในธรรมชาติ ซึ่งได้จากการย่อยสลายโปรตีนด้วยกรด (มนตรี และคณะ, 2530)

1.3.3 ปัจจัยที่เร่งให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก) ตะกอนหนัก

ในช่วงเวลาที่มีอัตราการไหลของน้ำเสียช้าในระบบรวบรวมน้ำเสีย อัตราการไหลของน้ำเสียช้าจะทำให้วัตถุ เช่น กรวดและสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ ตกตะกอนในระบบรวบรวม ทั้งนี้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเจริญเติบโต และนำไปสู่การเปลี่ยนซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์เพิ่มขึ้นได้

ระบบรวบรวมน้ำเสียที่มีปัญหาในการตกตะกอนของของแข็ง พบว่า เมื่อมีทราย และกรวดสะสมอยู่ และอนุภาคเหล่านั้นถูกปกคลุมด้วยชั้นเมือกในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งมีแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่อยู่บริเวณผิวของวัตถุจะได้รับซัลเฟตอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเสีย แต่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ฝังตัวอยู่ด้านในวัตถุจะไม่ได้สัมผัสซัลเฟตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้แบคทีเรียเหล่านั้นอยู่ในสภาวะกึ่งมีชีวิตแต่ไม่เจริญเติบโต คือ ขั้นที่ไร้ออกซิเจน เมื่อพื้นที่ผิวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมากขึ้น ทำให้สัมผัสกับซัลเฟตได้เพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงจากซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ละลายน้ำ โดยความสัมพันธ์นี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ปริมาณซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้น ผลสุดท้ายจะถูกปลดปล่อยออกไปในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่มีกลิ่นเหม็น และเกิดการกัดกร่อน

ข) อุณหภูมิ

สภาวะในฤดูร้อน อุณหภูมิของน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เกิดการสันดาปของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์อย่างรวดเร็ว และเพิ่มความเข้มข้นของซัลไฟด์ส่วนที่ละลายน้ำ โดยคาดว่าอุณหภูมิน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น 7 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น 2 เท่า

ค) ปฏิกิริยารีดักชันแบบปั่นป่วน

ความปั่นป่วนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากน้ำเสีย ผลกระทบจากการกัดกร่อน และกลิ่นของซัลไฟด์เพิ่มขึ้นโดยขนาดของการปั่นป่วน จากกฎของเฮนรี พบว่า ความเข้มข้นของแก๊สเหนือของเหลว จะถูกควบคุมโดยความดันบางส่วนของแก๊ส เมื่อใช้กฎของเฮนรี พบว่า การทำให้พื้นที่ผิวของของเหลวเพิ่มขึ้น จะทำให้เพิ่มแรงขับจากสภาวะของเหลวไปสู่สภาวะแก๊ส

โดยทั่วไปความปั่นป่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของของเหลวได้ ทำให้เกิดการปลดปล่อยซัลไฟด์จากรูปที่ละลายน้ำไปสู่รูปแก๊ส สาเหตุของความปั่นป่วนจะถูกระบุและวัดปริมาณ เพื่อป้องกันและ/หรือควบคุมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปล่อยออกมาภายหลัง กลไกการปลดปล่อยเดียวกันนี้ถูกอธิบายได้ว่า เมื่อใดก็ตามน้ำเสียที่มีซัลไฟด์ละลายอยู่จะถูกปลดปล่อยได้เมื่อมีอากาศ

2. ผลเสียของน้ำที่มีสารประกอบซัลเฟอร์

โดยปกติแล้วซัลเฟตเป็นสารที่อยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน สำหรับการเปลี่ยนรูปของสารซัลเฟอร์มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ ส่วนในสภาวะไร้อากาศซึ่งไม่มีแก๊สออกซิเจน และไนเตรท สารประกอบซัลเฟตจะเป็นตัวรับอิเลคตรอนจากสารอินทรีย์ทำให้เกิดซัลไฟด์ ในการสันดาปของแบคทีเรีย หลังจากนั้นซัลไฟด์จะมีปฏิกิริยาแตกตัวของกรดอ่อนไอโปรติกเพื่อเข้าสู่สมดุลเคมี ดังนี้

$HS^- \longleftrightarrow H^+ + S^2$ .....(1)

$K_{a2} = 1.3x10^{-13}$

$H_2S(aq) \longleftrightarrow H^+ + HS^-$ .....(2)

$K_{a1} = 9.1x10^{-8}$

$H_2S(g) \longleftrightarrow H_2S(aq)$

จากปฏิกิริยาสมดุลเคมีของกรด-เบส จะพบว่าที่พีเอช เท่ากับ 8 หรือมากกว่า 8 ซัลเฟอร์จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลไฟด์ไอออน แต่ถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 7 ซัลเฟอร์เกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปที่ยังไม่แตกตัวของสารละลายกรดไฮโดรซัลฟิวริก และด้วยปฏิกิริยาสมดุลตามกฎของเฮนรี แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะระเหยออกมาจากสารละลายซึ่งมีกลิ่นเหม็นเหมือนแก๊สไข่เน่า ถ้าความเข้มข้นในอากาศมีมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษต่อคนและอาจจะเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครกต่างๆ เป็นต้น

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้เป็นสาเหตุสำคัญของการผุกร่อนเสียหายของท่อคอนกรีตที่ใช้ระบายน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในท่อที่มีระยะเวลาเก็บกักน้ำนานๆ และไม่มีระบบไหลเวียนอากาศที่ดี เรียกปรากฏการณ์การผุกร่อนนี้ว่า “คราวน์คอร์โรชั่น” (crown corrosion) โดยที่ซัลเฟตในน้ำเสียจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อระเหยขึ้นไปแล้วจะละลายในหยดน้ำที่เกาะอยู่ตามผนังด้านบนของท่อ จากนั้นแบคทีเรียสายพันธุ์ *Thiobacillus* จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นกรดซัลฟิวริก ดังนี้

$H_2S + 2O_2 \longleftrightarrow H_2SO_4$

กรดซัลฟิวริก ที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ค่าพีเอชต่ำประมาณ 2 ซึ่งสามารถกัดกร่อนท่อคอนกรีตได้ ความเสียหายของท่อคอนกรีตจากปรากฏการณ์นี้ จะยิ่งรุนแรงมากขึ้น เมื่อน้ำในท่ออยุดนิ่งหรือมีการไหลช้ามาก

ในกระบวนการเกิดแก๊สมีเทนซึ่งอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน จะมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ถ้าจะนำแก๊สมีเทนไปใช้เดินเครื่องยนต์ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เจือปนไม่ควรมีเกิน 750 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและปัญหามลสารซัลเฟตอื่นๆที่อาจเกิดขึ้น ปริมาณซัลเฟตในน้ำอาจเกิดขึ้นได้จากน้ำล้างเหมืองโดยที่สารประกอบซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรีย หรือปฏิกิริยาทางเคมีได้กรดซัลฟิวริก ดังตัวอย่างปฏิกิริยาของไพไรท์

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+$$

จากปฏิกิริยาข้างต้น พบว่าปริมาณซัลเฟตในน้ำเสียเพิ่มขึ้นแล้ว น้ำเสียยังมีค่าพีเอชต่ำลงและมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ

สารประกอบซัลไฟด์มีหลายตัวที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสภาพแวดล้อม ดังเช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีมากในธรรมชาติ เช่น ในบริเวณที่มีน้ำเสีย น้ำทิ้งจากโรงงาน น้ำพุร้อน ที่จะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์มาก น้ำจากแหล่งเหล่านี้นั้นมักมีกลิ่นเหม็น

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้าร่างกายในปริมาณเล็กน้อยจะถูกเผาผลาญได้ แต่ถ้าได้รับในปริมาณสูงอาจทำให้ตายทันที ส่วนคาร์บอนไดซัลไฟด์ และคาร์บอนิลซัลไฟด์ เมื่อหายใจเข้าไปในปริมาณมากพอจะทำให้ถึงแก่ความตายได้เช่นกัน ถึงแม้ความเป็นพิษจะอ่อนกว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็ตาม (ชัยวัฒน์, 2525)

ดังนั้น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงเป็นสารที่มีพิษมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาที่ได้รับ ซึ่งอาจจะถึงขั้นทำให้เสียชีวิตได้ถ้าได้รับในปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น เช่น ถ้าอยู่ในบรรยากาศที่มีปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ มากกว่า 200-600 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็อาจจะทำให้เสียชีวิตได้ เนื่องจากหายใจเอาแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เข้าไปในระบบหายใจ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิตจะจับตัวกับเมทิลโมโกลบิน เกิดสารสีเขียวของซัลฟ์เมทีโมโกลบิน ทำให้ฮีโมโกลบินในเลือดเกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนไม่ได้

3. ประเภทของซัลไฟด์

ปริมาณซัลไฟด์ ที่วิเคราะห์ ส่วนมากในน้ำและในน้ำเสีย จะมี 3 ชนิด คือ

1) ซัลไฟด์ทั้งหมด เป็นการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ ทั้งหมดโดยจะรวมเอาทั้งซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย ซึ่งได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน และซัลไฟด์ไอออน รวมทั้งสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะต่างๆที่สามารถละลายได้ในกรดซึ่งจะปะปนอยู่กับสารแขวนลอยในน้ำ สารประกอบโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายในกรด คือ คอปเปอร์ซัลไฟด์ และซิลเวอร์ซัลไฟด์ ในส่วนของซัลไฟด์ไอออน นั้นมีปริมาณน้อยมากจนอาจจะสามารถตัดทิ้งได้ไม่ต้องนำมาพิจารณาก็ได้ ทั้งนี้เนื่องจากที่พีเอช 12 จะมีปริมาณของซัลไฟด์ไอออน น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ของซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย และที่พีเอช 11 มีปริมาณของซัลไฟด์ไอออน น้อยกว่าร้อยละ 0.05 ของซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย

2) ซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย เป็นปริมาณซัลไฟด์ที่ละลายอยู่ในสารละลายซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการแยกเอาตะกอนและสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียไปแล้ว โดยวิธี flocculation หรือวิธี centrifugation หรือ settling สารประกอบซัลไฟด์ที่รวมกันเป็นปริมาณซัลไฟด์ที่ละลาย ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน และซัลไฟด์ไอออน ซึ่งปริมาณของแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย

3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัว เป็นปริมาณซัลไฟด์ในสารละลายซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณซัลไฟด์ที่ละลายได้ สามารถคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัว ได้จากความเข้มข้นของซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย ค่าพีเอชของสารละลายหรือน้ำเสีย และค่าคงที่การแตกตัว ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยมีข้อสังเกตดังนี้

(1) พีเอชต่ำๆ หรือสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดมาก ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัวจะสูง นั่นคือซัลไฟด์ส่วนที่ละลายส่วนมากจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ในปริมาณที่น้อยมากๆ

(2) พีเอชของสารละลายเป็นกลาง ในสารละลายจะมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ใกล้เคียงกับปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน และมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ในปริมาณที่น้อยมากๆ

(3) พีเอชของสารละลายเท่ากับ pKa_1 (logarithm of the first ionization constant) ในสารละลาย จะมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออนและมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ในปริมาณที่น้อยมากๆ

(4) พีเอชของสารละลายมีสภาพเป็นเบส ในสารละลายจะมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่าปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน และมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก

(5) พีเอชของสารละลายเป็นเบสมาก ในสารละลายจะมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยมากแต่จะมีปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออนอยู่มากและมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ในปริมาณที่น้อย นั่นคือจะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออนเป็นส่วนใหญ่ โดยแทบจะไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่เลย

4. การวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนด้วยวิธีโพเทนชิออเมทรี

โพเทนทิออเมทรี (potentiometry) เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าเทคนิคเดียวที่เซลล์เคมีไฟฟ้าเป็นชนิดเซลล์กัลวานิก คือ สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เกิดปฏิกิริยาได้เองที่ผิวของขั้วไฟฟ้าโดยไม่ต้องมีการให้ศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอก แล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ที่เกิดขึ้น โดยจัดทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ณ สภาวะสมดุล เนื่องจากมีปฏิกิริยาการให้และรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นตลอดเวลา

หลักการของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนทิออเมทรี คือ เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) และขั้วไฟฟ้าทำงานหรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (working or indicator electrode) ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ณ ภาวะสมดุลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสภาวะที่แทบไม่มีการไหลของกระแสในวงจรเลย

แผนภาพเซลล์เคมีไฟฟ้าของการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิออเมทรี เขียนได้ดังนี้

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง / สะพานเกลือ / สารละลายที่ต้องการ / ขั้วไฟฟ้าทำงานหรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก

สมการแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัด (E_{obs} หรือ E_{cell}) เขียนได้ดังนี้

E_{obs} หรือ E_{cell} = $E_{ind} - E_{ref}$ .....(3)

โดย E_{ind} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทำงานซึ่งเป็นไปตามสมการเนินสต์

E_{ref} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เช่น ขั้วคาโลเมลอิ่มตัว มีค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงเท่ากับ 0.242 V

ขั้วไฟฟ้าทำงานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ คือ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver Sulfide Selective Electrode)

ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซัลไฟด์ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าเลือกจำเพาะไอออน (ion seletive electrode, ISE) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเยื่อที่เป็นสารประกอบซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Ag_2S) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่ง Ag_2S เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยมาก มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ (K_{sp} ของ $Ag_2S = 6.0 \times 10^{-50}$) มีความคงตัวสูง ทนต่อสารพวกตัวออกซิไดซ์ และตัวรีดิวซ์ ทำเป็นแผ่นเยื่อได้โดยการอัดสารประกอบ Ag_2S ภายใต้ความดันสูงให้มีลักษณะแผ่นเยื่อบาง ๆ

แผ่นเยื่อ Ag_2S สามารถเจาะจงวิเคราะห์ได้ทั้ง Ag^+ และ S^{2-} โดย Ag_2S มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ไอออน S^{2-} เป็นไอออนลบที่อยู่กับที่ (fixed anionic site) และไอออน Ag^+ เป็นไอออนที่เคลื่อนที่ (mobile ion) ภายในแผ่นเยื่อจึงเป็นไอออนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนระหว่าง Ag^+ ไอออนภายในแผ่นเยื่อกับภายนอกแผ่นเยื่อ ดังนั้นจึงจัดขั้วไฟฟ้านี้เป็นขั้วไฟฟ้าที่เจาะจงกับ Ag^+ (Ag-ISE)

ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยน Ag^+ ระหว่างแผ่นเยื่อกับสารละลายตัวอย่าง เขียนสมการเนินสต์ได้ดังนี้

$$E_{cell} = K + 0.05916 \log [Ag^+] \quad \text{.....(4)}$$

และจากสมการการละลายของ Ag_2S และค่า K_{sp} เขียนได้ดังนี้

$$Ag_2S_{(S)} \rightleftharpoons 2\,Ag^+_{(aq)} + S^{2-}_{(aq)} \quad ; K_{sp} = [Ag^+]^2 [S^{2-}]$$

จะได้ $[Ag^{+}] = \sqrt{\frac{K_{sp}}{[S^{2-}]}}$

สามารถนำไปหาความเข้มข้นของ S^{2-} ได้ดังต่อไปนี้

$$E_{cell} = K + 0.05916 \log \sqrt{\frac{K_{sp}}{[S^{2-}]}}$$

$$E_{cell} = K + \frac{0.05916}{2} \log K_{sp} - \frac{0.05916}{2} \log [S^{2-}]$$

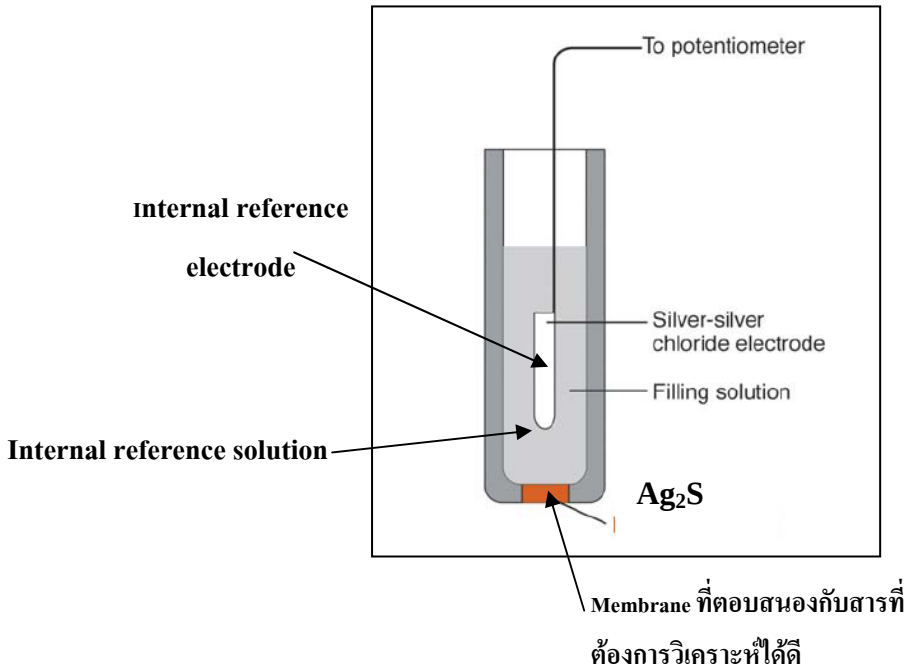
$$E_{cell} = K' - \frac{0.05916}{2} \log [S^{2-}]$$

โดย $K' = K + \frac{0.05916}{2} \log K_{sp}$

จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนด้วย ดังนั้นสามารถนำขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซัลไฟด์ ไปตรวจวัดหาปริมาณได้ทั้ง Ag^{+} และ S^{2-} โดยไม่ตอบสนองต่อไอออนอื่น ๆ ซึ่งในการตรวจวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนจะต้องมีการเติมสารละลาย alkaline antioxidant reagent (AAR) เพื่อยับยั้งไม่ให้แบคทีเรียมาทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ไอออน

จากสมการของ E_{cell} ข้างต้นจะเห็นว่าค่าศักย์ฟ้าที่วัดได้แปรโดยตรงกับลอการิทึมฐาน10 ของความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน ($\log[S^{2-}]$) ดังนั้นเมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ระดับค่าความเข้มข้นต่าง ๆ กัน มาพล๊อตกับค่า $-\log[S^{2-}]$ จะได้กราฟมาตรฐาน (calibration curve) ที่มีความชันเท่ากับ -29.58 มิลลิโวลต์ (mV)

การวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ไอออนในสารตัวอย่างทำได้โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเติมสารเช่นเดียวกันกับสารละลายมาตรฐาน และนำไปวัดค่าศักย์ไฟฟ้าเช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน นำค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มาเทียบหาความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนจากกราฟมาตรฐานที่เตรียมได้ หรือเทียบกับสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน



ภาพที่ 1 แสดงขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ซัลไฟด์
ที่มา: คณิตา (2542)

5. กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่ง ไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับจะมีความสามารถในการกำจัดสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี สารฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดีและระบบมีความทนต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อยและไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ

5.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

5.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ ขั้นตอนนี้เป็นการส่งมวลสารของสารที่ถูกดูดซับจากสารละลายไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ หรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ

5.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ เป็นการถ่ายโอนมวลสารจากมวลสารที่ถูก

ส่งถ่ายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวรอบ ๆ ของสารดูดซับเข้าสู่ภายในรูพรุนซึ่งมีพื้นผิวเป็นจำนวนมากสำหรับการดูดซับ

5.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

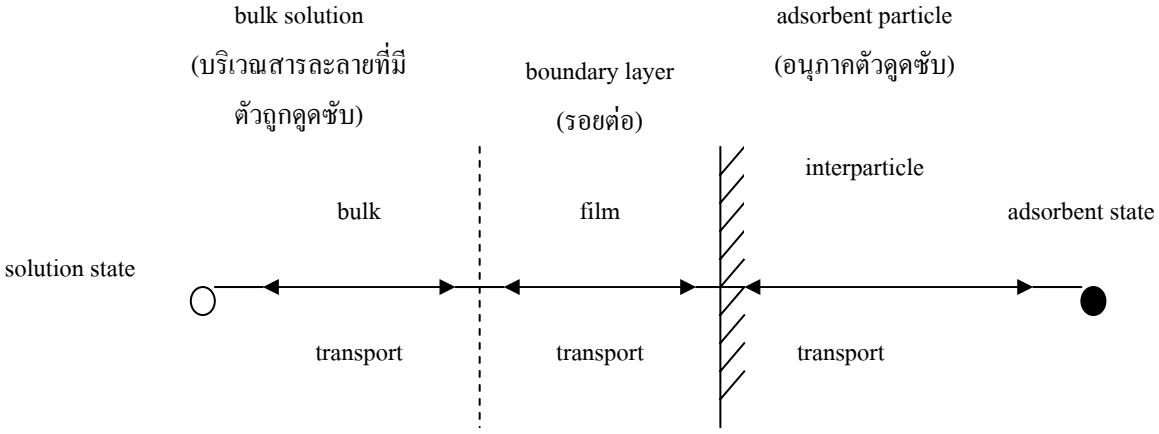
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

5.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

5.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

5.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ
ที่มา: Eckenfelder (1989)

5.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

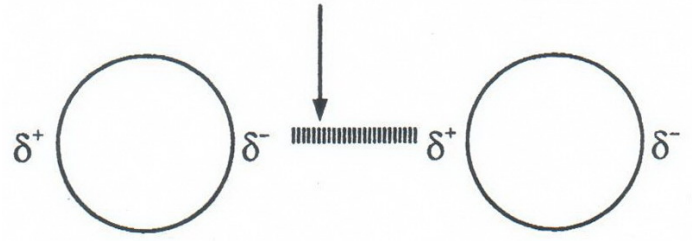
5.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับการดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุลให้อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุลทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภท ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่า แรงลอนดอน (london force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่งกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วอย่างชั่วคราวขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทาง

โมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อๆ ไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

แรงแวนเดอร์วาลส์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วยนอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย

induced dipole- induced dipole interaction

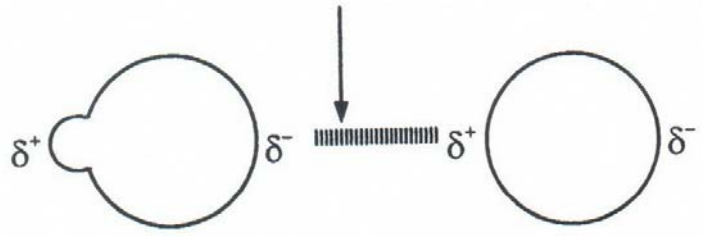


โมเลกุลไม่มีขั้ว ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

โมเลกุลไม่มีขั้ว ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction)

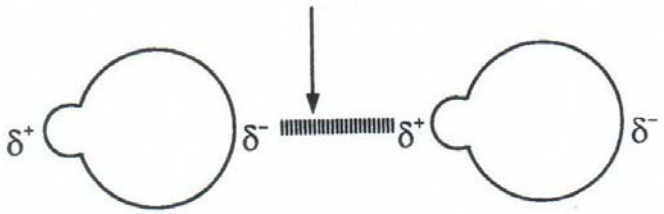
dipole- induced dipole interaction



โมเลกุลมีขั้ว โมเลกุลไม่มีขั้ว
ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction)

dipole-dipole interaction



โมเลกุลมีขั้ว โมเลกุลมีขั้ว

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเลคโทรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวก จึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเลคโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bon)

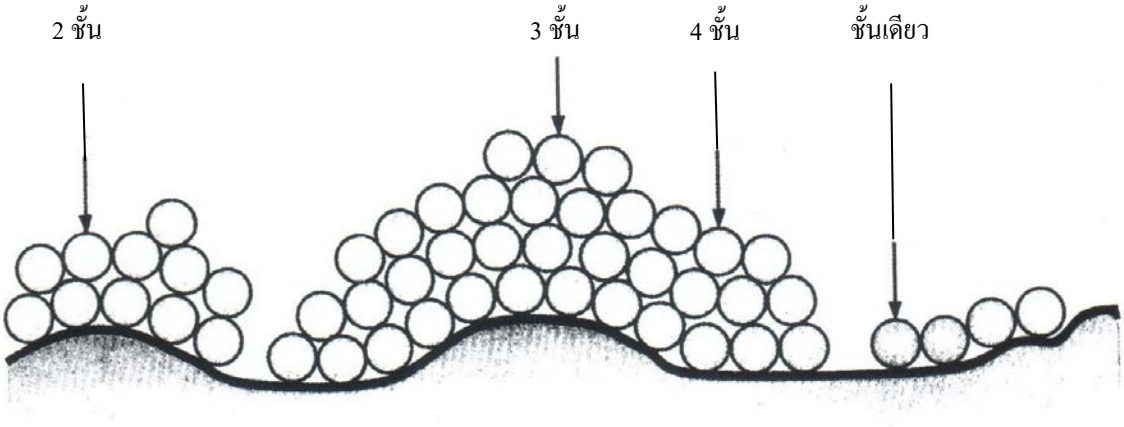
แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสารมารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

5.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

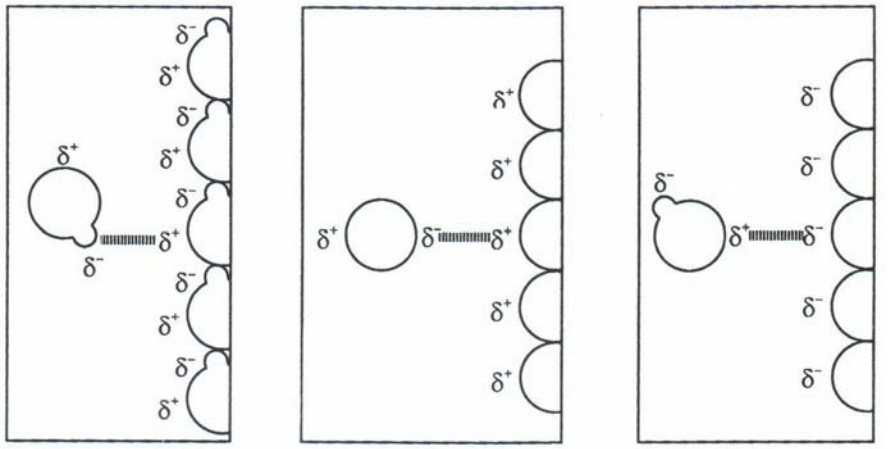
การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคายซ้ำ

5.4 รูปแบบของการดูดซับ

5.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der waals adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับและระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 3 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลมีขั้ว โมเลกุลไม่มีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 4 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

(ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

(ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

(ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

5.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

ตารางที่ 1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ multilayer	monolayer

ที่มา: พรรณราย (2546)

5.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (ชุติมา, 2544)

5.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุม โดยความต้านทานภายนอกที่

เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ

5.5.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (adsorbate characteristics) สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากการสารละลายอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

5.5.3 อัตราเร่งของการปั่นกวน (mixing speed) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรง ซึ่งขึ้นอยู่กับการปั่นกวนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกวนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงข้ามกัน ถ้าน้ำมีการปั่นกวนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

5.5.4 เวลาสัมผัส (contact time) เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะทำไปใช้งานจริง

5.5.5 ค่าพีเอช (pH) ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออน สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับ

5.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถใน

การดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ exothermic

5.6 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

5.6.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอกติเวเตดซิลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

5.6.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

5.6.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

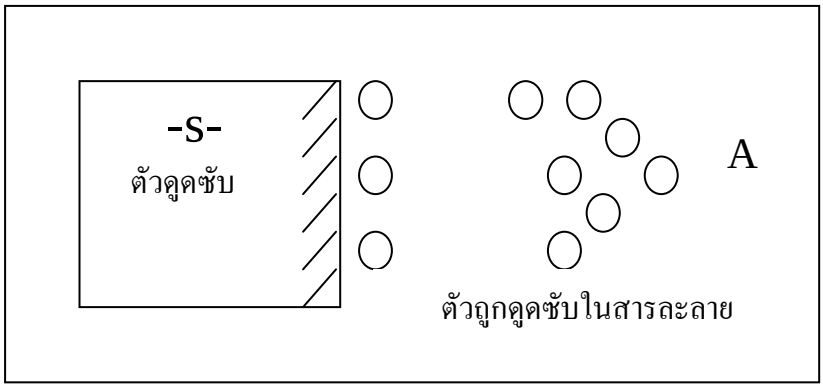
5.6.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว เปลือกไม้ เถ้าแกลบดำ เป็นต้น

5.6.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย เป็นต้น

5.7 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่ง ลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้นตอนต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับ

บางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายซับออกมามีปริมาณคงที่ จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อความดันสูง และจะลดลงเมื่อความดันต่ำลง



ภาพที่ 5 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg, mol/g และ mg/kg

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลิตร

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/l

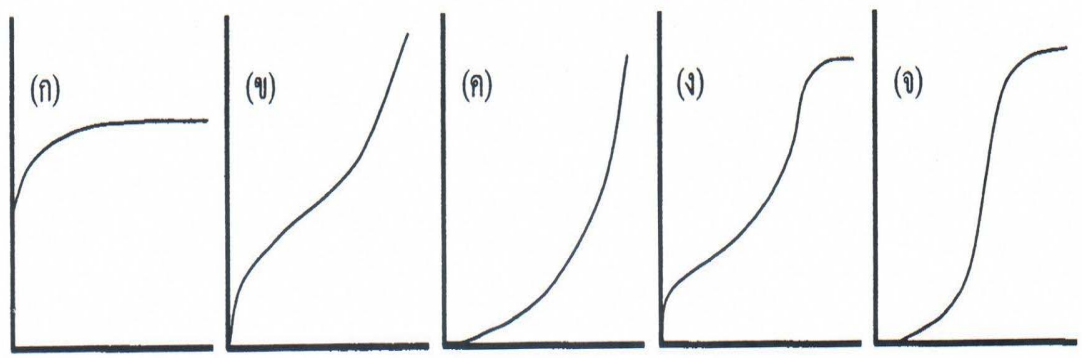
C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/l

ความสามารถในการดูดซับ นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวดูดซับเอง เช่น จำนวนช่องว่างหรือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของตัวดูดซับ โดยสภาวะการดูดซับนี้มีผลต่อสภาพสมดุลของการดูดซับ ซึ่งเป็นสภาวะการดูดซับที่จุดอิ่มตัว สภาพสมดุลของการดูดซับหาได้จากการทดลอง โดยนิยมนำเอาข้อมูลมาแสดงในลักษณะไอโซเทอร์ม (isotherm) โดยเป็นเส้นแสดงปริมาณการดูดซับ ตามการเปลี่ยนแปลงของความดัน ณ อุณหภูมิคงที่

5.8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

รูปกราฟที่พล๊อตระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน
ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 6 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

1) สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) คือไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \qquad \text{..... (6)}$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่ว ๆ ไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (7) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอกการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n}\log C \qquad \text{..... (7)}$$

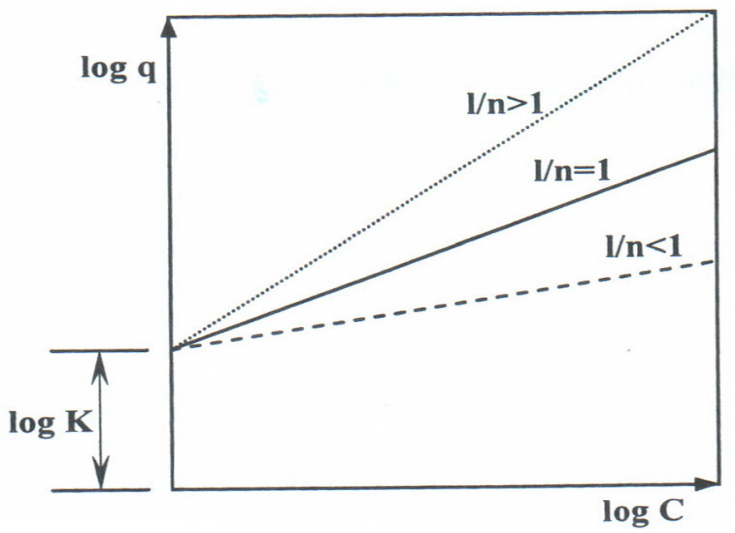
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ = ความชันของกราฟ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q กับ log C จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ log K



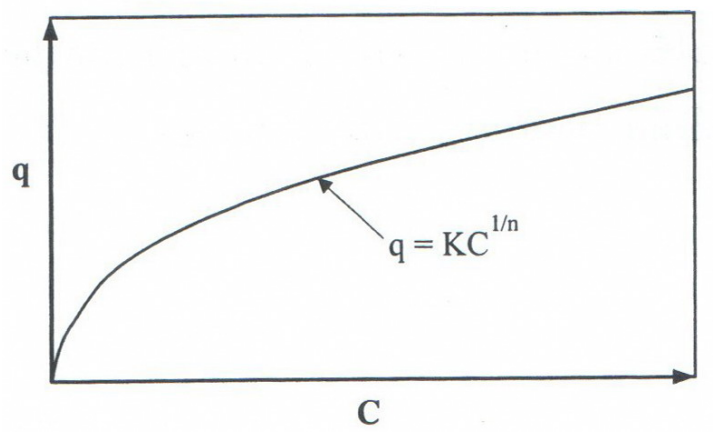
ภาพที่ 7 กราฟความชันระหว่าง log q และ log C
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

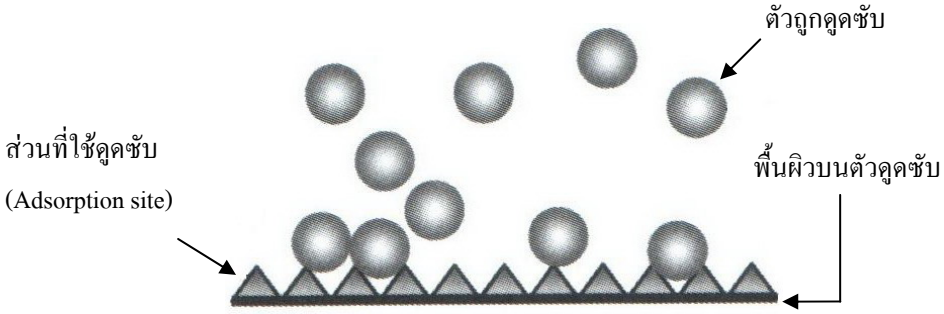
ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (7) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากสุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดิช
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

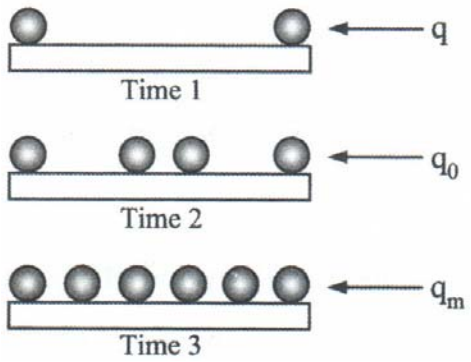
2) สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี พ.ศ. 2459 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี พ.ศ. 2475



ภาพที่ 9 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 9) โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการ

เคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากสุด)



ภาพที่ 10 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ (5.7) ถือว่าการดูดซับได้มากสุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์

รูปแบบสมการของแลงเมียร์จะใช้

$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \qquad \text{..... (8)}$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \qquad \text{..... (9)}$$

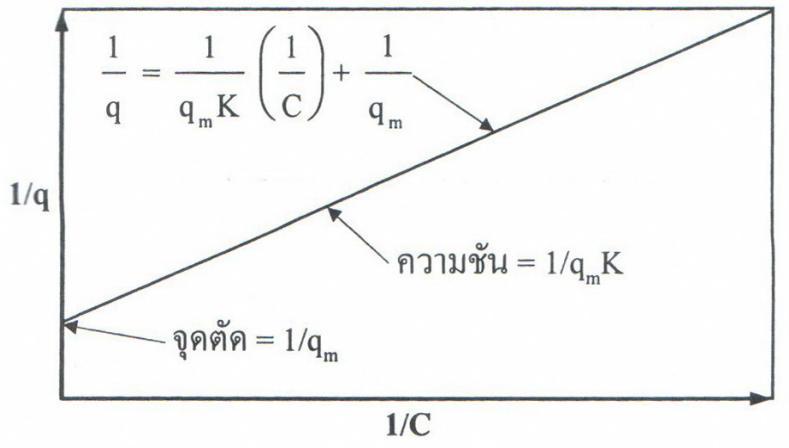
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$ และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$

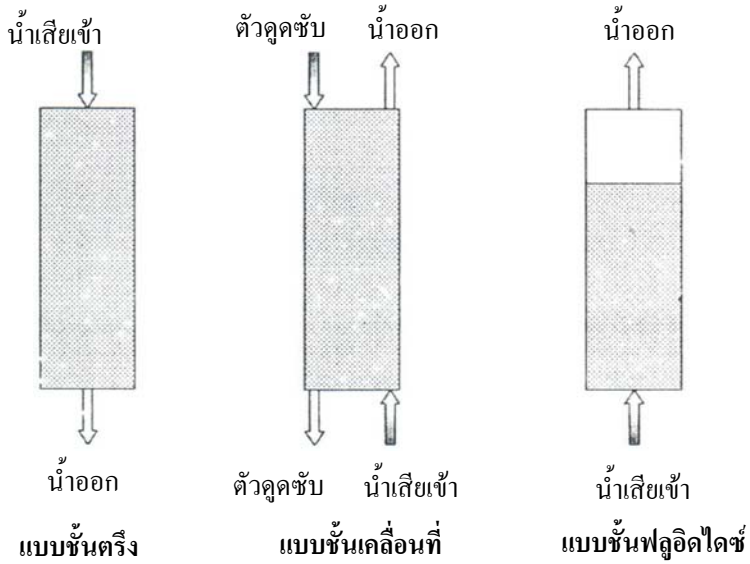


ภาพที่ 11 กราฟแสดงความชันระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

5.9 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง (Column)

ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบครั้งคราว ระบบแบบไหลต่อเนื่องนิยมใช้กับปริมาณน้ำเสียมาก ๆ ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ แบบชั้นตรึง แบบชั้นเคลื่อนที่ และแบบฟลูอิไดซ์ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 12 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง
ที่มา: กิตตินันท์ (2546)

5.9.1 แบบชั้นตรึง ระบบดูดซับแบบนี้โดยผ่านน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะไอออนเริ่มต้นเท่ากับ C_0 ให้ไหลลงผ่านชั้นตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ กระบวนการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับค่อย ๆ เคลื่อนลงจนถึงส่วนล่างของชั้นจนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนก้นของชั้น

5.9.2 แบบชั้นเคลื่อนที่ ระบบดูดซับแบบนี้ใช้ในน้ำเสียไหลขึ้นพร้อมกับมีการเปลี่ยนสิ่งดูดซับจากบริเวณส่วนก้นของถัง ซึ่งจะหมดสภาพก่อน ระบบนี้มักมีประสิทธิภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ไม่นิยมใช้กับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องควบคุมดูแลการเคลื่อนย้ายสิ่งดูดซับออกอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของถัง ระบบนี้มีใช้กันในงานแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม

5.9.3 แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วสูงมากพอให้สิ่งดูดซับเกิดการแขวนลอยในระบบได้ แต่ต้องไม่ทำให้สิ่งดูดซับลอยขึ้นมากจนหลุดออกจากชั้นดูดซับ ในการควบคุมระบบให้ได้ผลอย่างสม่ำเสมอควรมีการเติมสิ่งดูดซับใหม่เข้าจากด้านบนของถัง และถ่ายสิ่งดูดซับเก่าออกจากด้านล่างของถัง ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงกว่าระบบแบบชั้นตรึง แต่มีข้อดีที่ระบบสามารถรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้ค่อนข้างมากกว่า และสามารถเลือกใช้

สิ่งดูดซับที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ โดยปราศจากปัญหาสูญเสียความดันสูงเกินไปในระบบ (กิตตินันท์, 2546)

5.10 ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาการใช้งานของสารดูดซับ

5.10.1 ความลึกของชั้นสารดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของสารดูดซับมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกของชั้นสารดูดซับ และลดลงเมื่อความลึกของชั้นสารดูดซับลดลง

5.10.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเวลาการใช้งานจะมีแนวโน้มมากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

5.10.3 อัตราการบำบัด คือ อัตราที่ของไหลหนึ่งหน่วยปริมาตรเคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์สารดูดซับ มีค่าอยู่ในช่วง 2-10 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต จะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของสารดูดซับคือ ที่อัตราการบำบัดสูงจะมีเวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ

5.10.4 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับจะส่งผลต่อเวลาการใช้งาน โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับสูง ทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ (พรรณราย, 2546)

6. กระบวนการกรอง

กระบวนการกรองน้ำเป็นขั้นตอนหนึ่งในการทำความสะอาดน้ำ โดยการผ่านน้ำสู่ตัวกรองที่มีรูพรุนเพื่อกำจัดสารแขวนลอยต่าง ๆ ออกไป ด้วยกลไกทางกายภาพ และเคมี ทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการนี้มีความสะอาดตามต้องการ โดยการกรองจะเกิดขึ้นเมื่อมีกลไกการกรองน้ำดังต่อไปนี้

6.1 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (transport mechanism)

ในการกรองผ่านชั้นสารกรอง สารแขวนลอยเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี วิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนี่ยน (brownian diffusion) วิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอน (sedimentation) ในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ ขนาด และการกระจายขนาด (size distribution) ของสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อกลไกเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก

6.2 กลไกจับสารแขวนลอย (attachment mechanism)

สารแขวนลอยขนาดใหญ่อาจตกตะกอนและเกาะติดอยู่บนสารกรอง หรืออาจตกค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้สามารถกรองออกจากน้ำได้ อย่างไรก็ตามปรากฏว่าเครื่องกรองสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กออกจากน้ำได้ด้วย ซึ่งกลไกทางกายภาพเพียงลำพังไม่น่ากระทำได้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการกรองน้ำต้องอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย กลไกดังกล่าวคือ การดูดติดผิว และทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์สามารถเกาะจับอยู่บนสารกรอง หรือบนสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว อย่างไรก็ตาม สารกรองและคอลลอยด์มักมีประจุลบทั้งคู่ จึงต้องมีการทำลายประจุไฟฟ้าของสารตัวใดตัวหนึ่งก่อนหรือของทั้งคู่ เพื่อมิให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุเดียวกัน ในกรณีของการกรองน้ำ คอลลอยด์ในน้ำเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองซึ่งอยู่กับที่ ทำให้สามารถทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ก่อนผ่านเข้าชั้นกรองได้ หรือถ้าเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นประจุบวกก่อนผ่านเข้าชั้นกรอง ก็จะได้ผลในการกรองมากยิ่งขึ้น เพราะการที่สารกรองและคอลลอยด์ประจุต่างกัน เป็นการส่งเสริมการดูดติดผิวให้เกิดขึ้นได้อย่างเหนียวแน่น ในบางครั้งคอลลอยด์ต่าง ๆ อาจรวมกันเป็นฟล้อค ทำให้มีขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอนเป็นสารกรองหรือติดค้างอยู่ในระหว่างช่องว่าง (ฉัตรสินี, 2545)

7. สลัดจ์

7.1 นิยามและความหมาย

สลัดจ์ หมายถึง ส่วนวัสดุที่เคลื่อนตัวไป หรือแขวนลอยไป หรือตกตะกอนโดยน้ำเป็นตัวการ (วีระพล, 2531) ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของเสกสรรค์ (2543) กล่าวว่า สลัดจ์ หมายถึง ส่วนของวัสดุ ของแข็ง สารอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น ซากจุลินทรีย์ที่รวมตัวกัน ฯลฯ ที่ถูก พัดพาให้เคลื่อนตัว แขวนลอยหรือตกตะกอนโดยมีน้ำเป็นตัวการ

7.2 กำเนิดของสลัดจ์

ปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในระบบบ่อบำบัดน้ำเสียการเกิดตะกอนแปรผันตามช่วงเวลาหรือฤดูกาล มีปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเป็นตัวที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน การชะล้าง และพัดพาไปตามลำน้ำ สามารถสรุปที่มาของสลัดจ์ ได้ดังนี้

7.2.1 กระบวนการทางอุทกวิทยา โดยธรรมชาติกระบวนการทางอุทกวิทยาต่าง ๆ เช่น การไหลของน้ำ แรงจากเม็ดฝน ทำให้เกิดการกัดเซาะของดิน วัตถุและสารต่าง ๆ ชะล้างและพัดพาตามแรงกระทำของน้ำ และนำไปตกตะกอนตามลำน้ำต่าง ๆ เมื่อกระแสน้ำไหลช้าลง โดยสารวัตถุที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนก่อน และสารวัตถุที่มีขนาดเล็กจะถูกพัดพาไปไกลกว่าและตกตะกอนภายหลัง

7.2.2 กิจกรรมของมนุษย์ เช่นการทำเหมืองแร่ อุตสาหกรรม การทำถนน กิจกรรมเหล่านี้ ก่อให้เกิดตะกอนพัดพาลงสู่ลำน้ำได้ นอกจากนั้นกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น การชำระ การซักล้าง การขับถ่าย การประกอบอาหาร ฯลฯ ก่อให้เกิดน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนสารต่าง ๆ ระบายลงสู่แหล่งน้ำ สารเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อจับตัวกัน จะเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนได้เช่นกัน ของแข็งในน้ำเสียชุมชนที่ตกตะกอนได้ โดยปกติจะเป็นสารอินทรีย์ร้อยละ 75 และเป็นสารอนินทรีย์ร้อยละ 25 (วีระพล, 2531)

7.2.3 กิจกรรมของจุลินทรีย์ในน้ำเสีย โดยปกติแล้ว ในแหล่งน้ำต่าง ๆ มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำเสียซึ่งมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณมาก มักมีจุลินทรีย์

เจริญเติบโตได้ดี จุลินทรีย์เหล่านี้เมื่อมีการเจริญมากจะเกิดตายทับถมกลายเป็นซากอินทรีย์ตะกอนบริเวณท้องลำน้ำ เช่น ในบ่อบำบัดน้ำเสีย หนองน้ำ เป็นต้น

7.3 การเคลื่อนที่ของสลัดจ์

ขนาดของสลัดจ์จากต้นน้ำเหล่านี้จะค่อย ๆ เล็กลงไปทางท้ายน้ำ สาเหตุที่เล็กลงก็เพราะตะกอนเกิดการขัดสีจากการกลิ้ง กระโดด กระแทก ในขณะที่เคลื่อนที่ไป การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดการกัดกร่อน รวมไปถึงสลัดจ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนเร็วกว่าสลัดจ์ขนาดเล็ก ดังนั้น สลัดจ์ขนาดเล็กจึงถูกพัดพาไปไกลกว่าสลัดจ์ขนาดใหญ่

7.4 สมบัติของดินที่สำคัญ

7.4.1 เนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื้อดินบอกถึงปริมาณคอลลอยด์อนินทรีย์อย่างหยาบได้ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวขนาดเล็กมาก อยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักเป็นปริมาณมาก ดินที่มีเนื้อละเอียดขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น (ตารางที่ 2) การเพิ่มพื้นผิวให้สูงขึ้นในดินเนื้อหยาบก็สามารถทำได้เช่นกัน โดยการเติมคอลลอยด์อินทรีย์ลงไป ซึ่งได้แก่ฮิวมัส การเพิ่มอินทรียวัตถุในดิน เมื่อสลายตัวก็จะให้ฮิวมัสแก่ดินได้

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื้อดิน	**พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)**
เหนียว	150-250
ร่วนเหนียวปนซิลท์	120-200
ร่วนปนซิลท์	50-150
ร่วน	50-100
ร่วนปนทราย	10-40

ที่มา: ศุภมาศ (2540)

7.4.2 เนื้อดินกับความพรุนของดิน

เนื้อดินยังเกี่ยวพันกับความพรุนของดิน ดินเนื้อหยาบจะมีช่องขนาดใหญ่อยู่มาก แต่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย เมื่อดินแห้งลงจะอุ้มน้ำได้น้อยทำให้แก๊สถ่ายเทได้ดี ส่วนในดินที่มีปริมาณซิลท์สูงเมื่อฝนตกหรือระหว่างในน้ำจะสูญเสียโครงสร้างดินได้ง่าย ซิลท์จะไหลลงอุดตันช่องทำให้ช่องผิวหน้าดินปิด ดังนั้นแม้การให้น้ำเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ช่องบนผิวหน้าดินปิด ทำให้น้ำและแก๊สไหลถ่ายเทได้น้อยลง

กลุ่มอนุภาคของดินเหนียวมีขนาดเล็ก และส่วนใหญ่อยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงยากที่จะบ่งบอกขนาดและปริมาณช่องที่มีอยู่ในดินนี้ เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวอาจเกาะยึดกันเองเป็นเม็ดดินเสถียร ซึ่งในสภาพเช่นนี้ดินเหนียวจะมีความพรุนสูงมาก ในทางตรงข้ามหากอนุภาคไม่เกาะยึดกัน อยู่ในสภาพฟุ้งกระจาย ดินเหนียวลักษณะเช่นนี้จะแน่นทึบมาก น้ำและอากาศถ่ายเทได้ยากมาก

7.4.3 เนื้อดินกับการดูดซับ และการดูดซึม

ในดินการดูดซับที่สำคัญได้แก่ การดูดซับน้ำ และการดูดซับไอออนในสารละลายดิน ซึ่งในดินตัวดูดซับก็คือ อนุภาคดินเหนียว และอนุภาคอินทรียวัตถุ เพราะมีขนาดเล็กมาก จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนั้นอนุภาคทั้งสองชนิดยังมีประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นประจุลบเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี น้ำส่วนหนึ่งซึ่งเป็นสารประกอบมีขั้ว จึงอาจถูกดูดซับได้โดยกระบวนการนี้เช่นกัน

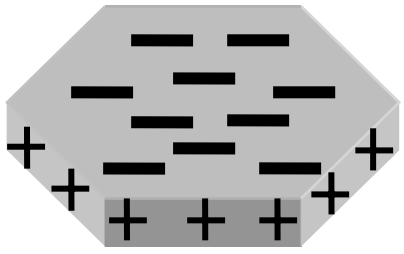
การดูดซึมที่สำคัญในดินก็คือ การดูดซึมน้ำ น้ำจะถูกดินดูดไว้ในช่องระหว่างอนุภาคดิน ช่องในดินไม่อาจดูดซึมน้ำไว้ได้ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะแรงดูดซึมจำต้องเอาชนะอิทธิพลแรงดึงดูดของโลกให้ได้ แรงดูดซึมนี้มีความสัมพันธ์โดยกลับกับขนาดของช่อง ยิ่งช่องมีขนาดเล็กแรงดูดซึมก็ยิ่งมาก ดังนั้นปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมไว้จึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดิน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณมาก (เนื้อดินละเอียด) จะดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มากโดยเหตุผลเดียวกัน

7.4.4 เนื้อดินกับอินทรียวัตถุในดิน

ดินเนื้อละเอียดจะมีอินทรียวัตถุสูงกว่าดินเนื้อหยาบ อาจเกิดได้เนื่องจากดินเนื้อละเอียดอุ้มน้ำและดูดซับไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืชได้มาก ดินเนื้อหยาบมีการระบายอากาศที่ดีกว่าดินเนื้อละเอียด อัตราการสลายตัวของอินทรียวัตถุถึงสูงกว่า ทำให้เหลือปริมาณอินทรียวัตถุน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด

7.5 ความเป็นประจุของดิน

อนุภาคดินโดยทั่วไปจะมีทั้งประจุบวก และประจุลบ แต่จะมีจำนวนประจุลบมากกว่า อาจกล่าวได้ว่าดินเป็นก้อนของประจุลบ และผิวด้านนอกจะดูดซับไอออนบวกไว้อย่างหลวมๆ คือ พวก Na, K, Ca และ Mg ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่มีในดินโดยทั่วไปทำให้สภาพปกติของดินเป็นแบบที่เรียกว่า ion double layer กล่าวคือเป็นสภาพที่มีประจุสองชั้น ชั้นในเป็นประจุลบของดิน ส่วนชั้นนอกเป็นประจุบวกที่ถูกดูดซับไว้ และจากการจับกันอย่างหลวมๆ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวก ชนิดอื่นๆ ได้ เราเรียกประจุบวก พวกนี้ว่า “exchange cation” ดังในภาพที่ 12



ภาพที่ 13 ลักษณะการกระจายตัวของประจุบวกและประจุลบบนอนุภาคดิน
ที่มา: กิตตินันท์ (2546)

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กานดา และคณะ (2540) ได้ทำการศึกษาการใช้ไคโตแซน และผงถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมผ้า โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าของผงถ่านกัมมันต์อิสระและไคโตแซนผสมผงถ่านกัมมันต์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของผงถ่านกัมมันต์อิสระกับไคโตแซนผสมผงถ่านกัมมันต์ให้ผลใกล้เคียงกัน และได้ทำการเปรียบเทียบผลของพีเอช พบว่า

สารละลายสีย้อมที่มีสภาพเป็นกรด ตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น และเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่แตกต่างกัน พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น จะทำให้การดูดซับมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ก็มีค่าจำกัดในการดูดซับ และได้ทำการทดลองเปรียบเทียบสัดส่วนของไคโตแซนผสมผงถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อม โดยให้ปริมาตรของสารละลายสีย้อมคงที่ในขณะที่ปริมาตรของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น พบว่า การเพิ่มปริมาตรตัวดูดซับจะทำให้ประสิทธิภาพตัวดูดซับสูงขึ้น

กานดา และคณะ (2545) ได้ศึกษาการดูดซับฟีนอลน้ำเสียโดยใช้เถ้าแกลบดำ พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 10.75 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียสังคราะห์ ปริมาณเถ้าแกลบดำ 4 กรัม สภาพความเป็นกรดด่างที่ 7 ใช้ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตรวจวัดหาปริมาณฟีนอลที่เหลือในน้ำทิ้งโดยใช้เทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโตรเมทรี พบว่ามีค่าปริมาณการดูดซับฟีนอลร้อยละ 91.7 และจากผลการศึกษาแบบคอลัมน์โดยใช้ คอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรบรรจุด้วยเถ้าแกลบ 5 และ 10 กรัม พบว่า ค่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าถึงร้อยละ 73.98 และ 99.16 ตามลำดับ

ชุติมา และพรพิมล (2544) ได้ศึกษาการดูดซับทองแดง และแคดเมียม ในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตแซน พบว่า ปริมาณไคโตแซนเพิ่มขึ้น สามารถดูดซับโลหะได้มากขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณไคโตแซนก็เหมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ คือการเพิ่มหมู่อะมิโนอิสระของไคโตแซน และพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เป็นเพราะความไม่เสถียรของแคดเมียมและทองแดงที่พื้นผิวของไคโตแซน เมื่อเวลาสัมผัสมากขึ้นทำให้การดูดซับโลหะมากขึ้น แต่พอถึงระยะเวลาหนึ่งการดูดซับเริ่มคงที่ และน้อยลงไป ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงและแคดเมียมลดลง ดังนั้นเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 12 ชั่วโมง และพบว่าการเขย่ามีผลต่อการดูดซับ นั่นคือประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่อเขย่าจะดีกว่า ส่วนการเพิ่มจำนวนในการเติมไคโตแซนใหม่แทนที่ไคโตแซนที่ผ่านการดูดซับ จะมีผลต่อการดูดซับโลหะ จำนวนรอบที่เหมาะสมในการเติมไคโตแซนในการทดลองนี้ คือ 4 รอบ

ทวีธรรม และคณะ (2546) ได้ทำการศึกษาการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุธรรมชาติในการดูดซับน้ำมัน โดยการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับ 3 ชนิดได้แก่ กกธูป ฝ้าย และนุ่น โดยทำการทดลองหาค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ และความสามารถในการดูดซับน้ำมัน แล้วจึงวัดค่าประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำของวัสดุแต่ละชนิด ปรากฏว่า ประสิทธิภาพอยู่

ในช่วงร้อยละ 0-88 ขึ้นอยู่กับเวลาและชนิดของวัสดุดูดซับ ทั้งนี้สามารถเสนอวิธีการทำนายประสิทธิภาพของวัสดุโดยให้วัดค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ประกอบด้วยแล้วนำมาสร้างเป็นค่าดัชนีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ (oil/water holding index: OWI)

ภาสกร และคณะ (2543) ได้ศึกษาถึงการดูดซับตะกั่ว และโครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าลอย ในการบำบัดสารละลายมาตรฐาน และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาถึงผลของพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิและไอโซเทอร์มของการดูดซับ พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับตะกั่วและโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ คือ พีเอช 3 สำหรับขี้เถ้าลอย พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับตะกั่วและโครเมียม คือ พีเอช 4 และ พีเอช 5 ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียส ในทุกๆ การทดลอง โดยสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง โดยพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดโครเมียมได้ร้อยละ 98.41 และกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 83.93 ในขณะที่ขี้เถ้าลอยสามารถกำจัดโครเมียมได้ร้อยละ 1.51 และกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 25.93 ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงเป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมกว่าขี้เถ้าลอยในการกำจัดโลหะหนัก

ธิติมา และมนตรี (2544) ได้ศึกษาการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย ด้วยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการนำชานอ้อยมาเผาให้เป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับโครเมียมของสารละลายมาตรฐาน เพื่อที่จะให้มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับได้ดีนั้นจึงต้องนำชานอ้อยที่เผาแล้วมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยศึกษาปริมาณซิงค์คลอไรด์ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม วิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน พบว่า ปริมาณซิงค์คลอไรด์ 30 กรัม อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกระตุ้น 1.5 ชั่วโมง จะได้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 933.54 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำ ชานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นและมาดูดซับโครเมียมของสารละลายมาตรฐาน ศึกษาพีเอชและความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น พบว่า ที่พีเอช 2 ปริมาณโครเมียมสารละลายมาตรฐานเหลือน้อยที่สุดเท่ากับ 11.49 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการกำจัดเท่ากับ 71.28 และปริมาณโครเมียมเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานที่เหมาะสม เท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าร้อยละการกำจัดสูงสุด

นริศรา (2545) ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่โดยใช้เถ้าแกลบดำ ซึ่งจะเป็นการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณตะกั่วจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วออกไซด์ คือ ระดับพีเอช ความสูงเถ้าแกลบดำ และอัตราการกรอง จากนั้น นำปัจจัย

ที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้แบบจำลองพลาสติกใสทรงกระบอก พบว่า ประสิทธิภาพในการลดปริมาณตะกั่วจะเกิดได้ดีที่พีเอชเท่ากับ 3 ความสูงของเถ้าแกลบดำ 60 เซนติเมตร และอัตราการกรองละ 4 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง และประสิทธิภาพในการลดปริมาณตะกั่วโดยเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 99.85 ส่วนผลการศึกษากับน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ พบว่า พีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 4 ความสูงเถ้าแกลบดำ 60 เซนติเมตร และอัตราการกรอง 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง พบว่า เถ้าแกลบดำสามารถลดปริมาณตะกั่วให้ค่าตะกั่วอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมได้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ประวิทย์ และปิยวรรณ (2548) ได้ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้กากสาคูเป็นวัสดุดูดซับ ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ขนาดอนุภาคของวัสดุ ระดับพีเอชของน้ำเสีย ระยะเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล และอุณหภูมิของน้ำเสีย พบว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของวัสดุดูดซับลดลง ระดับพีเอชของน้ำเสีย ระยะเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล และอุณหภูมิของน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วด้วยกากสาคูคือค่าพีเอชเท่ากับ 4.0 ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับแคดเมียมคือค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 ระยะเวลา 12 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

วันวิภา (2546) ได้ทำการศึกษาการนำชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน แต่ละความเข้มข้นจะทำการปรับค่าพีเอชให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2 ถึง 6 พบว่า ผลความเข้มข้นของตะกั่วและพีอชเริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่ว ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มพีเอชจะทำให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเช่นกัน และที่พีเอช 6 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด จากนั้นนำชานอ้อยที่ใช้กำจัดตะกั่วแล้วมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ซึ่งได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของมอร์ตาผสมชานอ้อย พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของมอร์ตาผสมชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

อดิศักดิ์ (2546) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายและการดูดซับด้วยเถ้าแกลบดำ พบว่า การกรองด้วยทรายทำให้ระบบบำบัด

มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและของแข็งแขวนลอยในเบื้องต้นได้สูง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของระบบบำบัด เนื่องจากชั้นเถ้าแกลบดำเกิดการอุดตันช้าลง โดยระบบบำบัดจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดที่อัตราน้ำล้นผิวต่ำสุด และความสูงของชั้นเถ้าแกลบดำมากที่สุดในชั่วโมงแรกของการบำบัด ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่า การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายแบบกรองช้าร่วมกับการดูดซับด้วยเถ้าแกลบดำ มีประสิทธิภาพดีกว่าการกรองด้วยทรายอย่างเดียว

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1 อุปกรณ์

1.1 pH meter รุ่น 315

1.2 เครื่องเขย่า Model VRN-480 GEMMY Orbit Shaker

1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น AB 204-S

1.4 เครื่องโพเทนทิออเมทรีกับขั้วไฟฟ้ารวมซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode)

1.5 เครื่องบดละเอียด

1.6 ตะแกรงแยกขนาด

1.7 ตู้อบ

1.8 เครื่องแก้ว

1.9 เดสซิเคเตอร์

1.10 ขวดรูปชมพู่

1.11 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman

2. สารเคมี

2.1 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.1 M

2.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 M

2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 N

2.4 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน ได้แก่ สารละลาย sodium sulfide

2.5 สารเคมีสำหรับเตรียมสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (alkaline antioxidant reagent : AAR) ประกอบด้วย สารละลาย EDTA สารละลายกรดแอสคอร์บิก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.6 สลัดจ์ 2 ชนิด ได้แก่ สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี

วิธีการ

1. การเตรียมสลัดจ์

นำสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสียมาตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำสลัดจ์มาบดให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน เก็บผงสลัดจ์ที่ผ่านการร่อนไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน

เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากโซเดียมซัลไฟด์ โดยการชั่งโซเดียมซัลไฟด์ 2.44 กรัม ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นในปริมาณพอเหมาะ เขย่าให้โซเดียมซัลไฟด์ละลาย จุก จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร แล้วเขย่าให้เข้ากันและปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

3. การเตรียมสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (alkaline antioxidant reagent : AAR)

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 20 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมกรดแอสคอร์บิก จำนวน 8.75 กรัม และ EDTA จำนวน 16.75 กรัม ลงไป จากนั้นคนจนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน และเก็บไว้ในที่มืด

4. การเตรียมกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน

4.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั่งโซเดียมซัลไฟด์ 0.244 กรัม ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นในปริมาณพอเหมาะ เขย่าให้โซเดียมซัลไฟด์ละลาย จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร แล้วเขย่าให้เข้ากันและปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

4.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมไว้จำนวน 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัม ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 8 ขวด แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากันแล้วปิดจุก (สารละลายแต่ละขวดจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ)

4.3 ปิเปตสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ในแต่ละความเข้มข้นมาอย่างละ 50 มิลลิลิตร เติมสารละลาย AAR จำนวน 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และนำไปตรวจวัดด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode นำค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ กับความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออนมาสร้างกราฟโดยแกนตั้งแทนค่าความศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ส่วนแกนนอนแทนค่า $-\log[S^{2-}]$ จะได้กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ดังแสดงในภาคผนวก

5. การดำเนินการทดลอง

5.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานที่มีผลต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนด้วยสลัดจ์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทดลองโดยชั่งสลัดจ์ ปริมาณ 1 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออนเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3.5, 4, 4.5, 5 และ 5.5 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเขย่า 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นนำน้ำเสียไปกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนไว้กับสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ของสลัดจ์ที่ใช้ดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน โดยการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทดลองโดยชั่งสลัดจ์ ปริมาณ 1 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออนเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 5.1 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่ 10, 30, 50, 70 และ 90 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นนำน้ำเสียไปกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนไว้กับสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.3 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนด้วยสลัดจ์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทดลองโดยชั่งสลัดจ์ ปริมาณ 1 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออนเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 5.1 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน)ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 5.2 หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างที่ 10, 30, 50, 70 และ 90 นาที หลังจากนั้นนำน้ำเสียไปกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนไว้กับสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนด้วยสลัดจ์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทดลองโดยชั่งสลัดจ์ ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออนเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 5.1 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 5.2 ตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลาสัมผัสที่ได้จากการทดลองที่ 5.3 หลังจากนั้นนำน้ำเสียไปกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนไว้กับสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นและไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนด้วยสลัดจ์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทดลองโดยชั่งสลัดจ์ ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 5.4 และเติมสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้น 800, 1,000, 1,200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 5.1 ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาปั่น

กวน ที่ได้จากการทดลองที่ 5.2 หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลาสัมผัสที่ได้จากการทดลองที่ 5.3 หลังจากนั้นนำน้ำเสียไปกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนไว้กับสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.6 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน โดยการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้สารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 5.1 ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี ปริมาตร 20 กรัม เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบอายุการใช้งาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์ ภายหลังการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

ทำการทดลองโดยนำสลัดจ์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 N เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบให้แห้ง หลังจากนั้นนำสลัดจ์ที่ได้มาทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน โดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์ปริมาณเท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที หลังจากนั้นนำน้ำเสียไปกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนไว้กับสารละลาย

ด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

5.9 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี

เนื่องจากน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ทั้ง 4 จุด มีสภาวะที่แตกต่างของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจากการทดลองแบบแบทช์ดังตารางภาคผนวกที่ 19 และ 20 แต่การศึกษานี้ทำการทดลองดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสีย ที่มีซัลไฟด์ไอออนเจือปน นำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนเริ่มต้นก่อน หลังจากนั้นนำน้ำเสียมาทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ ของสลัดจ์แต่ละชนิด แล้วหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode

6. สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

ทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาทำการวิจัยเริ่มตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2550 ถึง เดือนเมษายน พ.ศ. 2551

ผลและวิจารณ์

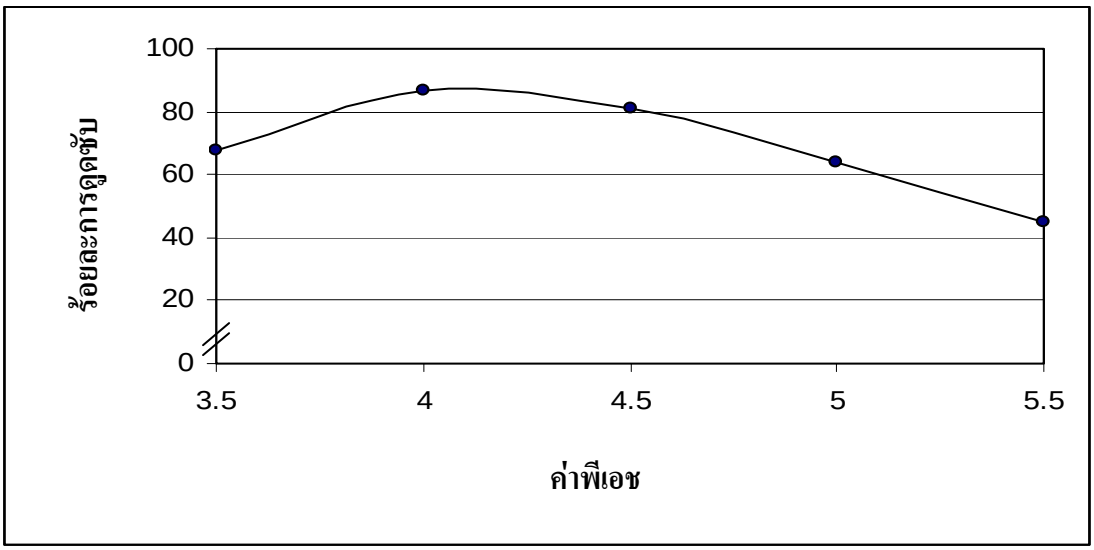
ผล

การศึกษาการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนซัลไฟด์ไอออน โดยการทดลองแบบแบทช์ ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช (pH) ระยะเวลาปั่นกวน (equilibrium time หรือ shaking time) ระยะเวลาสัมผัส (contact time) ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออน ปริมาณสลัดจ์ และศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดิช รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน โดยเทียบจากค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรีเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี พร้อมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนซัลไฟด์ไอออน โดยการทดลองแบบคอลัมน์ และศึกษาการคืนสภาพของสลัดจ์หลังการใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออน

1.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทดลองแปรผันค่าพีเอช โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 3.5, 4, 4.5, 5, และ 5.5 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



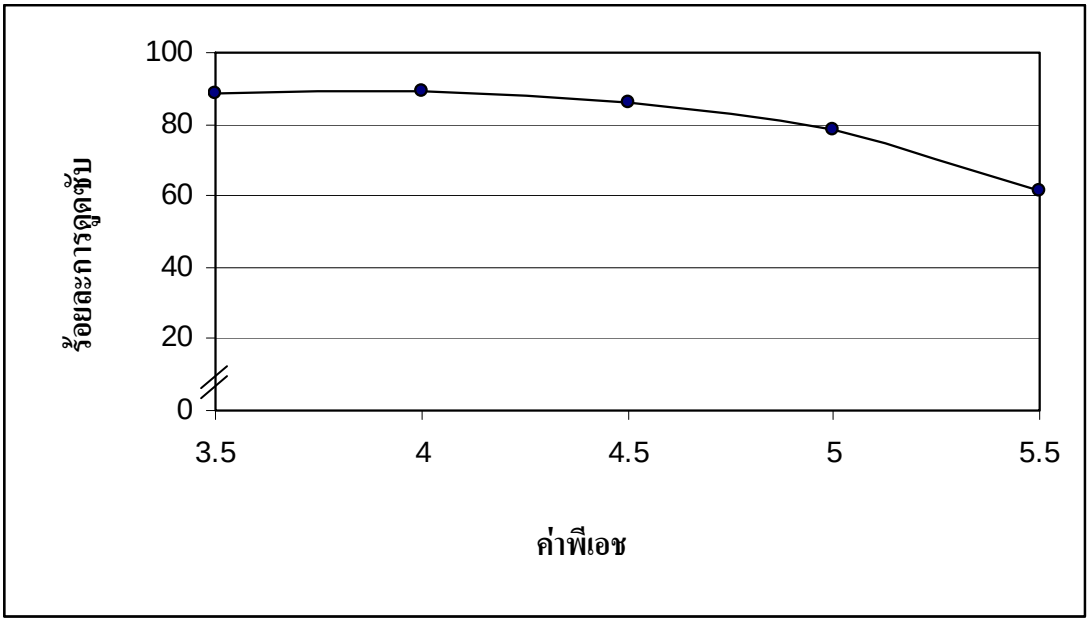
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 14 พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้นประสิทธิภาพในการในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่พีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเกิดขึ้นสูงที่สุด หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะค่อย ๆลดลง เนื่องจากซัลไฟด์ไอออนเกิดการตกตะกอน จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ดังนั้นช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการดูดซับซัลไฟด์ไอออน คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 86.82

1.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทดลองแปรผันค่าพีเอช โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 3.5, 4, 4.5, 5, และ 5.5 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

ใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



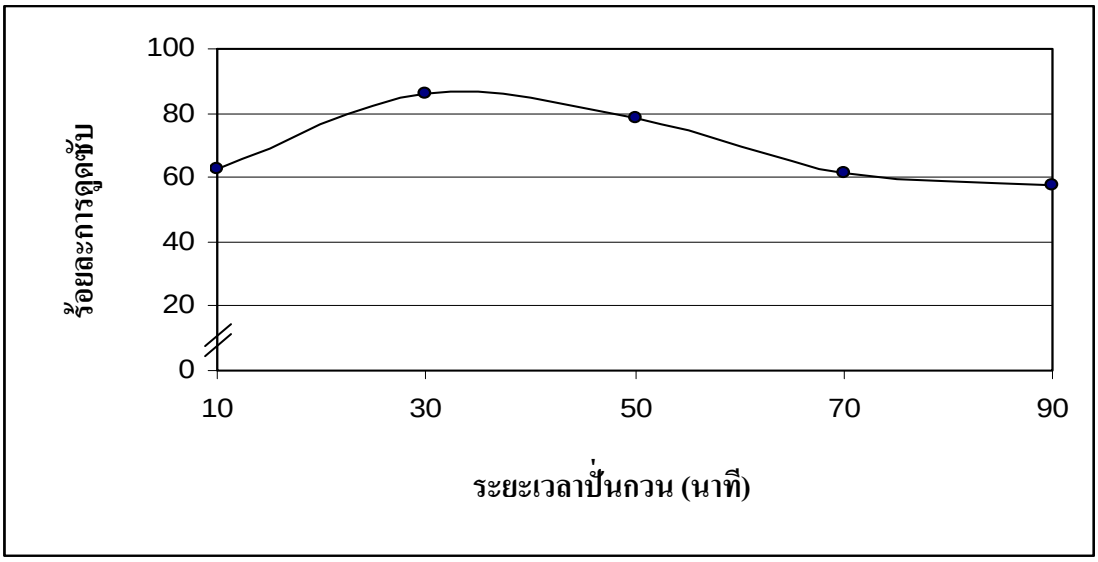
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนสูงขึ้นประสิทธิภาพในการในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่พีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเกิดขึ้นสูงที่สุด หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะค่อย ๆลดลง เนื่องจากซัลไฟด์ไอออนเกิดการตกตะกอน จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ดังนั้นช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการดูดซับซัลไฟด์ไอออน คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 89.49

2. ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ของสลัดจ์ที่ใช้ดูดซับซัลไฟด์ไอออน

2.1 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือตามระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

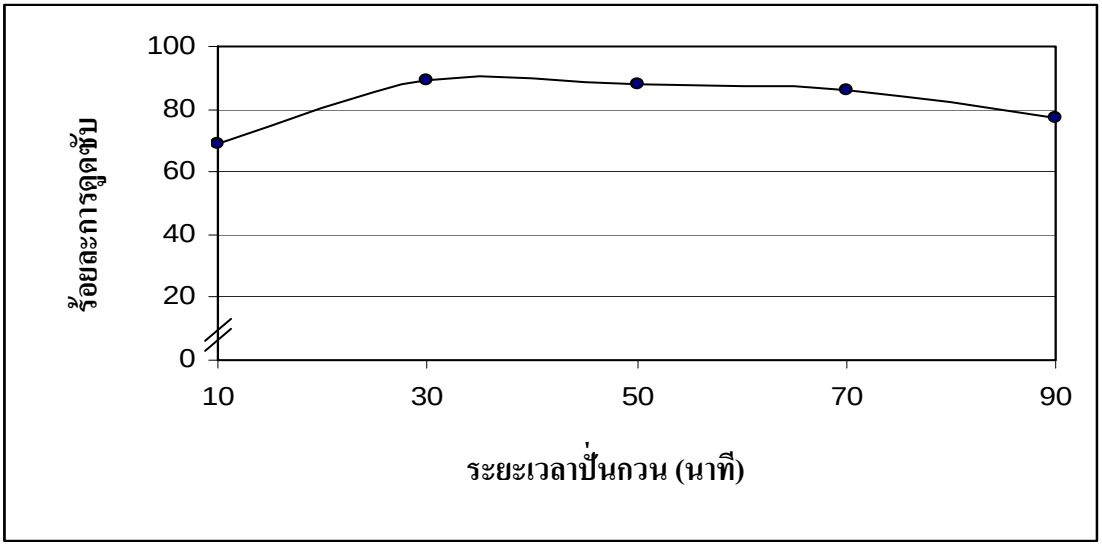


ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 16 พบว่า เมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มขึ้น จนถึงระยะเวลาปั่นกวนที่ 30 นาที การดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเกิดขึ้นสูงสุด และจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดระยะเวลาปั่นกวนที่ 90 นาที ดังนั้นระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 85.87

2.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 90 นาที เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือตามระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



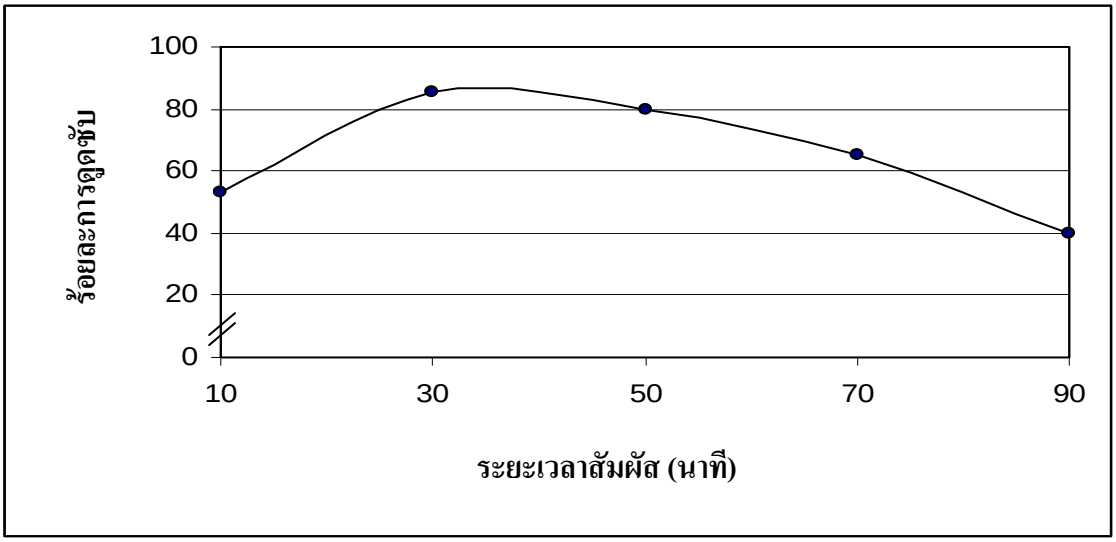
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 17 พบว่า เมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มขึ้น จนถึงระยะเวลาปั่นกวนที่ 30 นาที การดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเกิดขึ้นสูงสุด และจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดระยะเวลาปั่นกวนที่ 90 นาที ดังนั้นระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 89.28

3. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์

3.1 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน โดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะตั้งทิ้งไว้เพื่อให้สลัดจ์ดูดซับสารละลายซัลไฟด์ไอออน โดยจะทำการเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาต่าง ๆ เป็นเวลา 90 นาที และวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ตามระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



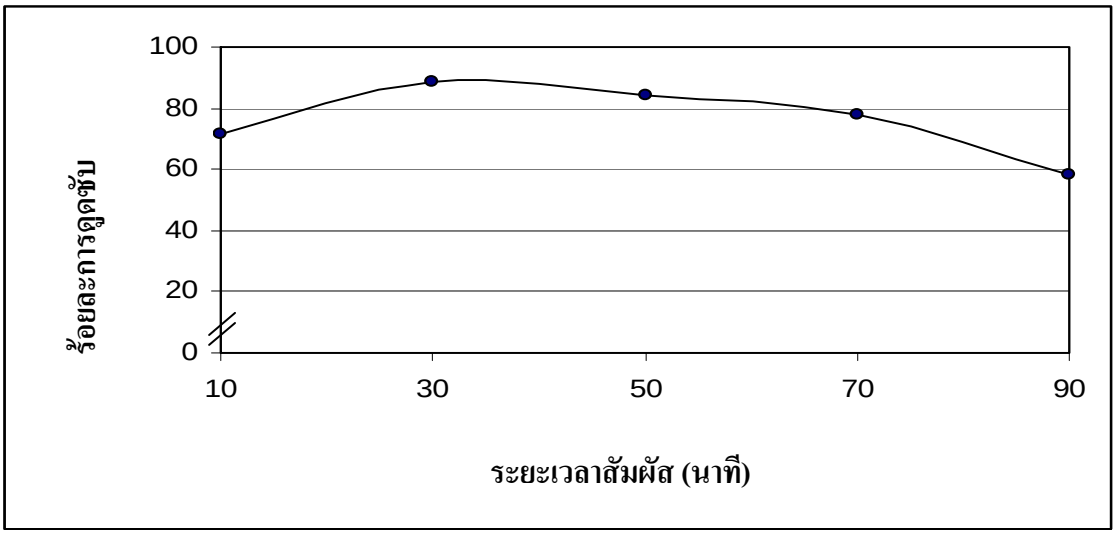
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มขึ้น จนถึงระยะเวลาปั่นกวนที่ 30 นาที การดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเกิดขึ้นสูงสุด และจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดระยะเวลาปั่นกวนที่ 90 นาที เนื่องจากเมื่อ

พื้นผิวของสลัดจ์ถูกปกคลุมไปด้วยซัลไฟด์ไอออน ทำให้ไม่มีช่องว่างเหลือพอที่จะดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายได้อีก อัตราการดูดซับจึงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนลดลงด้วย ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจึงเท่ากับ 30 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 85.55

3.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะตั้งทิ้งไว้เพื่อให้สลัดจ์ดูดซับสารละลายซัลไฟด์ไอออน โดยจะทำการเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาต่าง ๆ เป็นเวลา 90 นาที และวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือของสารละลายมาตรฐาน ตามระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

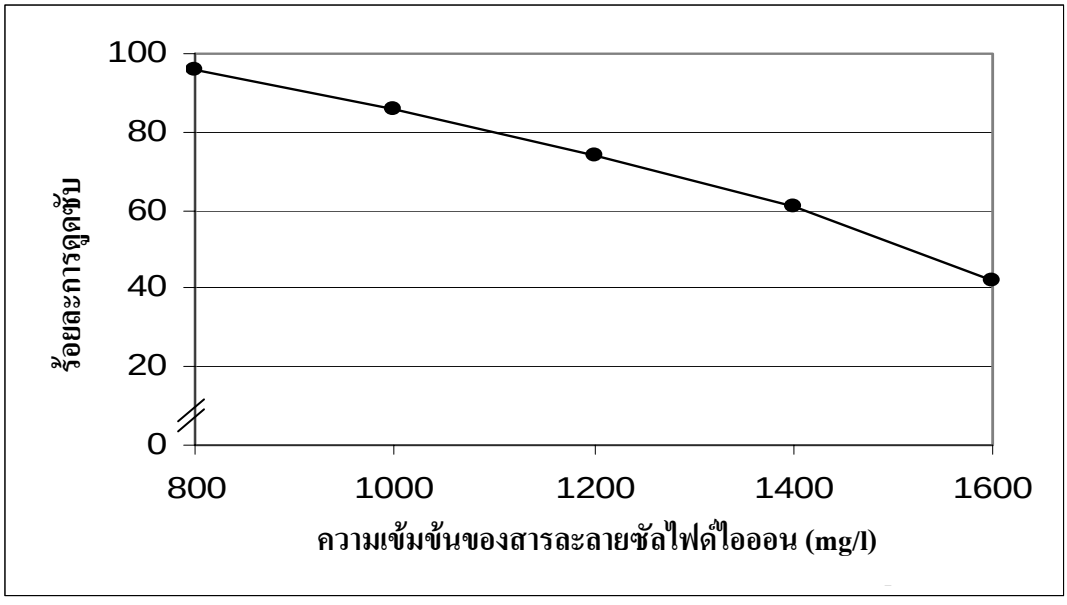
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 19 พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มขึ้น จนถึงระยะเวลาปั่นกวนที่ 30 นาที การดูดซับซัลไฟด์ไอออน

จะเกิดขึ้นสูงสุด และจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดระยะเวลาปั่นกวนที่ 90 นาที เนื่องจากเมื่อพื้นผิวของสลัดจ์ถูกปกคลุมไปด้วยซัลไฟด์ไอออน ทำให้ไม่มีช่องว่างเหลือพอที่จะดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายได้อีก อัตราการดูดซับจึงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนลดลงด้วย ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจึงเท่ากับ 30 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 88.52

4. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน

4.1 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800, 1,000, 1,200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และปริมาณสลัดจ์ เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

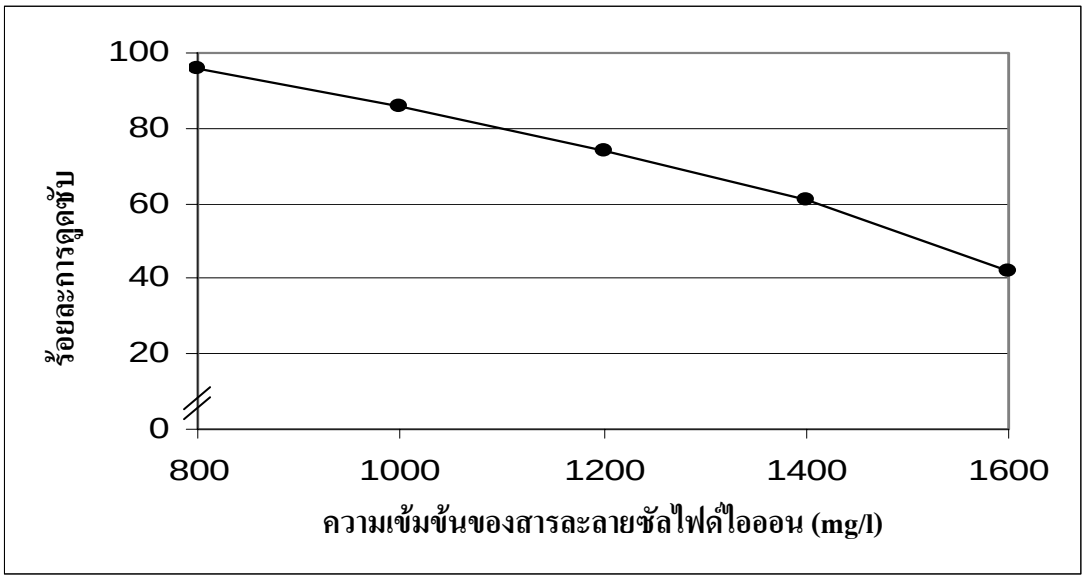


ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 20 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากใช้ปริมาณสลัดจ์เท่ากัน ในการดูดซับที่ความเข้มข้นต่างกัน จากน้อยไปหามาก ดังนี้ 800, 1,000, 1,200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 96.11, 85.54, 74.25, 61.09 และ 41.94 ตามลำดับ

4.2 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800, 1,000, 1200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และปริมาณสลัดจ์ เท่ากับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน

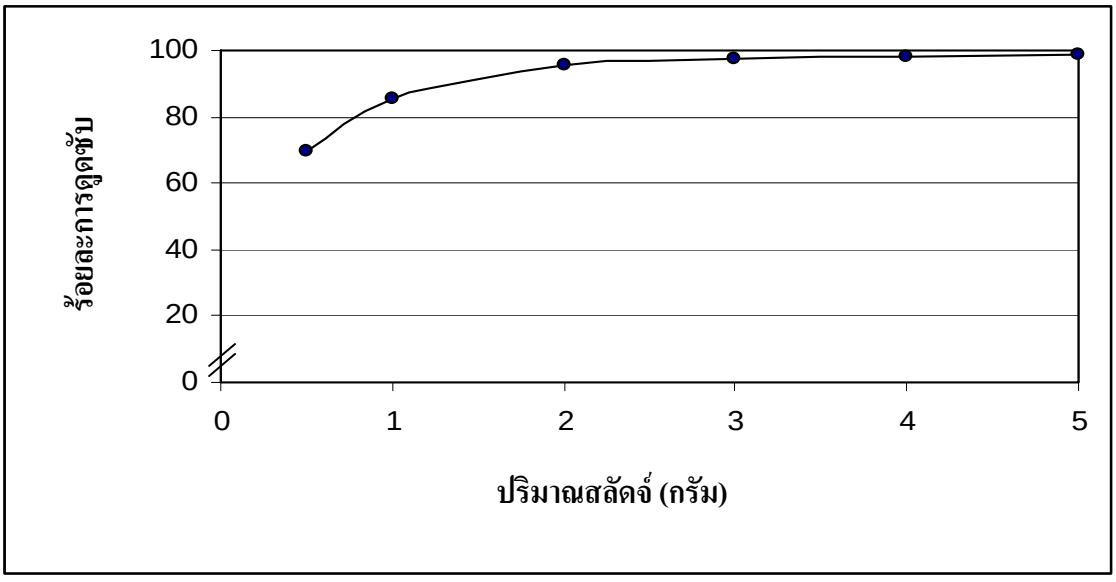
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 21 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากใช้ปริมาณ

สลัดจ์เท่ากัน ในการดูดซับที่ความเข้มข้นต่างกัน จากน้อยไปหามาก ดังนี้ 800, 1,000, 1,200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 95.73, 89.28, 71.10, 58.31 และ 40.59 ตามลำดับ

5. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสลัดจ์และไอโซเทอร์มในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน

5.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสลัดจ์และไอโซเทอร์มในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

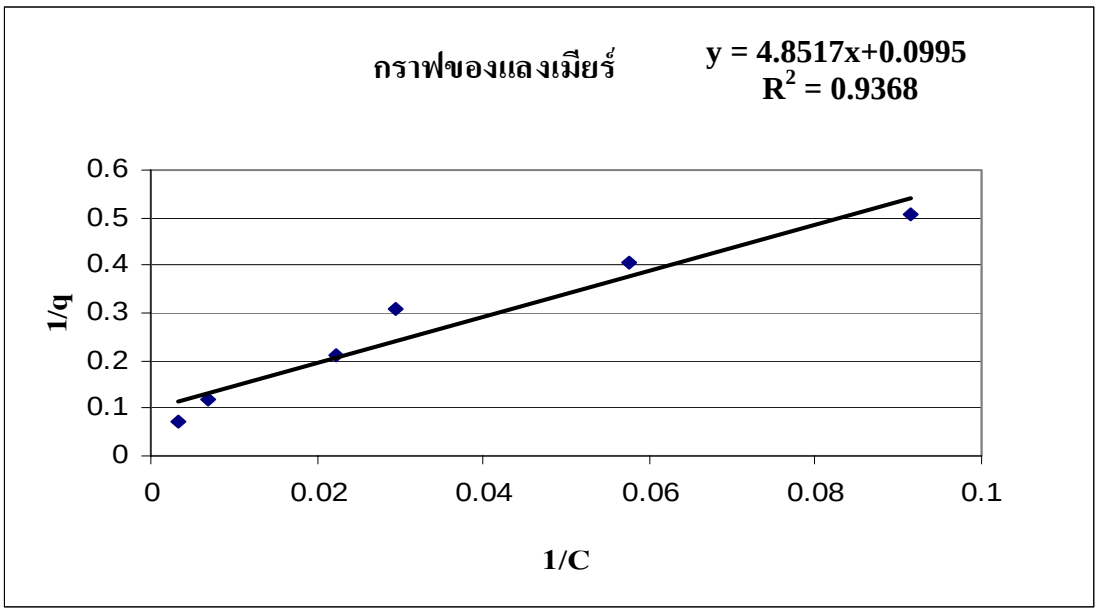
การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ในการทดลองนี้จะทำการแปรผันปริมาณสลัดจ์ ในช่วง 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 22 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มมากขึ้น โดยที่ใช้ปริมาณสลัดจ์ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้สูงสุด และประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะน้อยที่สุดเมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์ 0.5 กรัม เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อสลัดจ์มีขนาดเท่ากัน ปริมาณสลัดจ์ที่มากกว่าจึงมีพื้นผิวการดูดซับสูงกว่า นอกจากนี้ ดังนั้นปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับซัลไฟด์ไอออน คือ ปริมาณสลัดจ์ เท่ากับ 1 กรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 85.54

สำหรับไอโซเทอร์มในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี เมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรุนดิช ดังภาพที่ 23 และ 24 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจากสารละลายมาตรฐานทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.936 และ 0.989 ตามลำดับ ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700 – 1.0200) แต่ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์นั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจากสารละลายมาตรฐานจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดิช และกลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชมากกกว่า เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของฟรุนดิชคือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด การดูดซับจะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับเนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว และพบว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้เท่ากับ 8.554 มิลลิกรัม



ภาพที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 10

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K}\left(\frac{1}{C}\right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{---------- (10)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 4.851\ \frac{1}{C} + 0.099 \quad \text{---------- (11)}$$

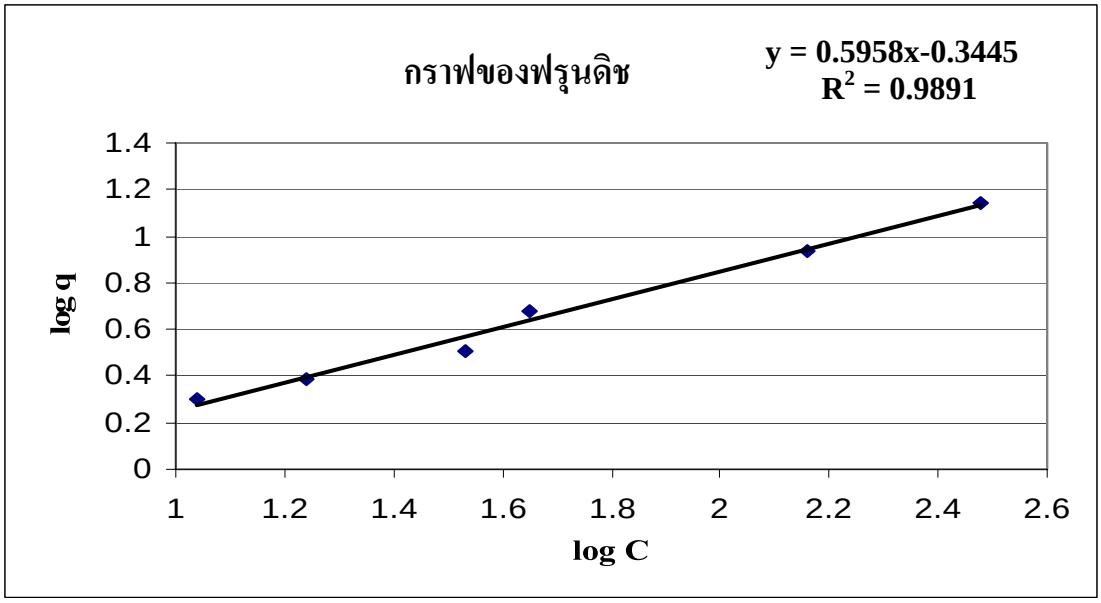
จากสมการที่ 11 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง 1/q กับ 1/C จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 4.851 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ 0.099 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 4.851$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.099$$

ดังนั้น K = 0.0204

จากไอโซเทอร์มการดูดของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณซัลไฟด์ไอออนถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี



ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของล็อกการิทึมได้ดังสมการที่ 12

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{---------- (12)}$$

$$\log q = -0.3445 + 0.5958 \log C \quad \text{---------- (13)}$$

จากสมการที่ 13 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q กับ log C จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.5958 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ - 0.3445 นั่นคือ

$$\log K = -0.3445$$

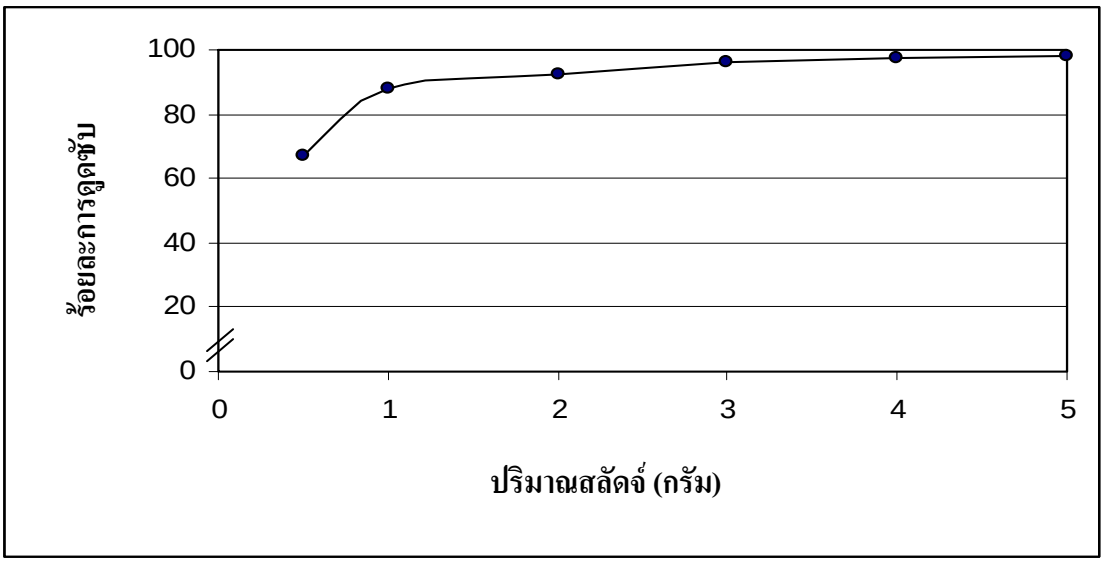
$$1/n = 0.5958$$

$$n = 1.6784$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี พบว่า ค่า 1/n มีค่าเกือบเท่ากับ 1 แสดงถึงมีความจุของการดูดซับที่ดี นอกจากนี้ค่า n ยังใช้บอกความสามารถในการดูดซับอีกด้วย กล่าวคือ ค่า n มากกว่า 1 หมายความว่า ตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณา n ที่ได้จากการทดลอง อาจกล่าวได้ว่า สลัดจ์เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับที่ใช้ในการดูดซับสารละลายซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้ดี

5.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสลัดจ์และไอโซเทอร์มในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ในการทดลองนี้จะทำการแปรผันปริมาณสลัดจ์ในช่วง 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

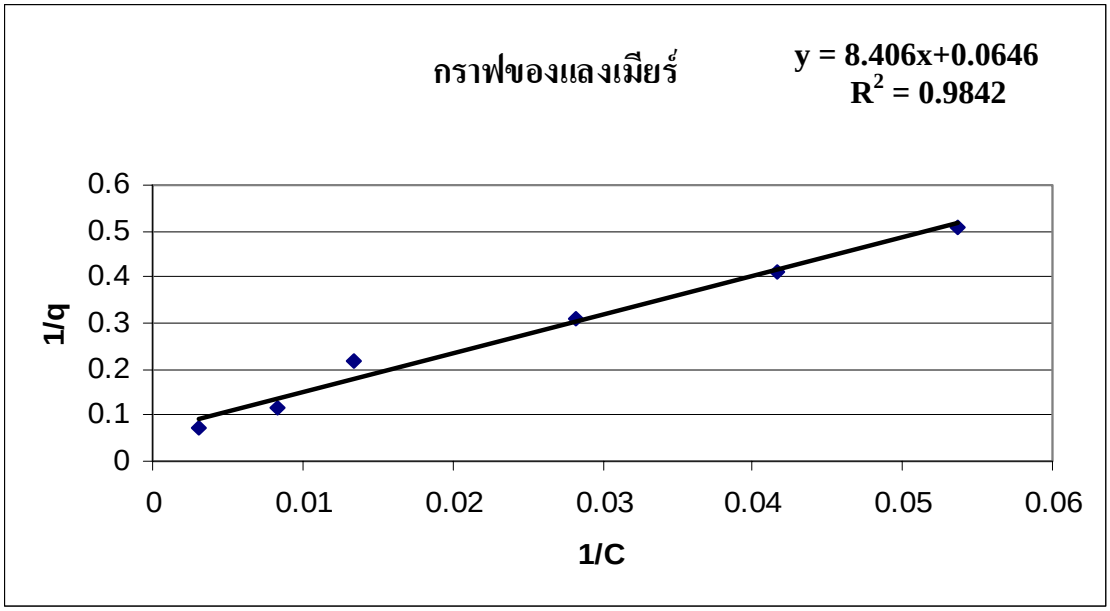


ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 25 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะเพิ่มมากขึ้น โดยที่ใช้ปริมาณสลัดจ์ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้สูงสุด และประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะน้อยที่สุดเมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์ 0.5 กรัม เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อสลัดจ์มีขนาดเท่ากัน ปริมาณสลัดจ์ที่มากกว่าจึงมีพื้นผิวการดูดซับสูงกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์มากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์เพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับซัลไฟด์ไอออน คือ ปริมาณสลัดจ์ เท่ากับ 1 กรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 87.90

สำหรับไอโซเทอร์มในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี เมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ดังภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจากสารละลายมาตรฐานทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.984 และ 0.979 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700 – 1.0200) ดังนั้นการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจากสารละลายมาตรฐานจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟรุนดิช แต่ทั้งนี้จะกลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับ

ของแลงเมียร์มากกว่าเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว และพบว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้เท่ากับ 8.79 มิลลิกรัม



ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 14

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K}\left(\frac{1}{C}\right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----------} \quad (14)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 8.406 \frac{1}{C} + 0.064 \quad \text{---------- (15)}$$

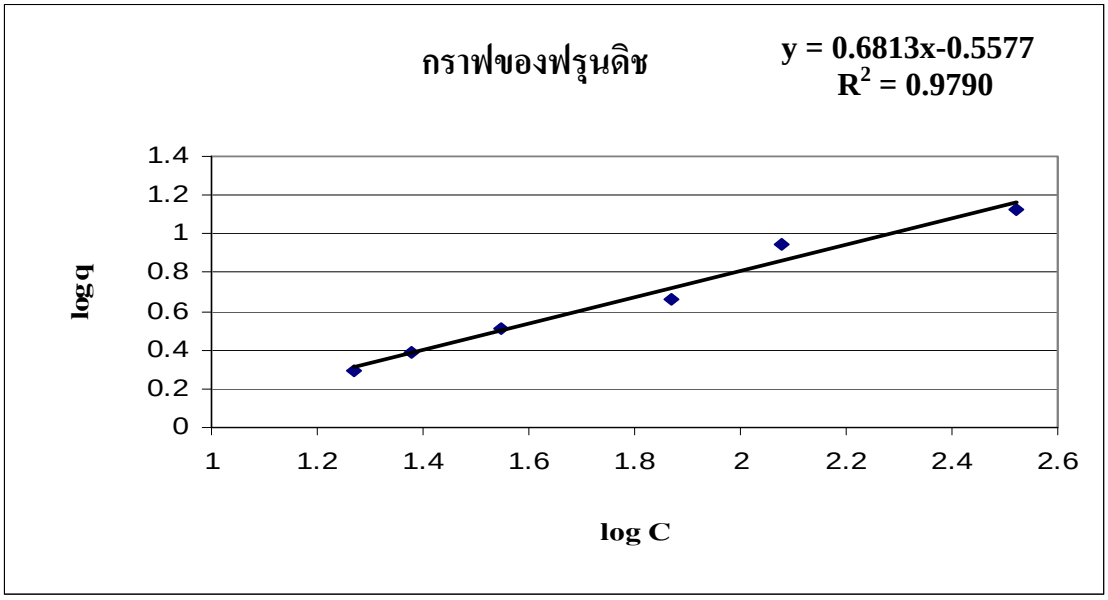
จากสมการที่ 15 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง 1/q กับ 1/C จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 8.406 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ 0.064 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 8.406$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.064$$

ดังนั้น $K = 0.0076$

จากไอโซเทอร์มการดูดของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณซัลไฟด์ไอออนถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยใช้สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของล็อกการิทึมได้ดังสมการที่ 16

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{---------- (16)}$$

$$\log q = -0.5577+0.6813 \log C \quad \text{---------- (17)}$$

จากสมการที่ 17 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q กับ log C จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6813 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -0.5577 นั่นคือ

$$\log K = -0.5577$$
$$1/n = 0.6813$$
$$n = 1.4678$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจากสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี พบว่า ค่า 1/n มีค่าเกือบเท่ากับ 1 แสดงถึงมีความจุของการ ดูดซับที่ดี นอกจากนี้ค่า n ยังใช้บอกความสามารถในการดูดซับอีกด้วย กล่าวคือ ค่า n มากกว่า 1 หมายความว่า ตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณา n ที่ได้จากการทดลอง อาจกล่าวได้ว่า สลัดจ์เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับที่ใช้ในการดูดซับสารละลายซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้ดี

6. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนโดยการทดลองแบบคอลัมน์

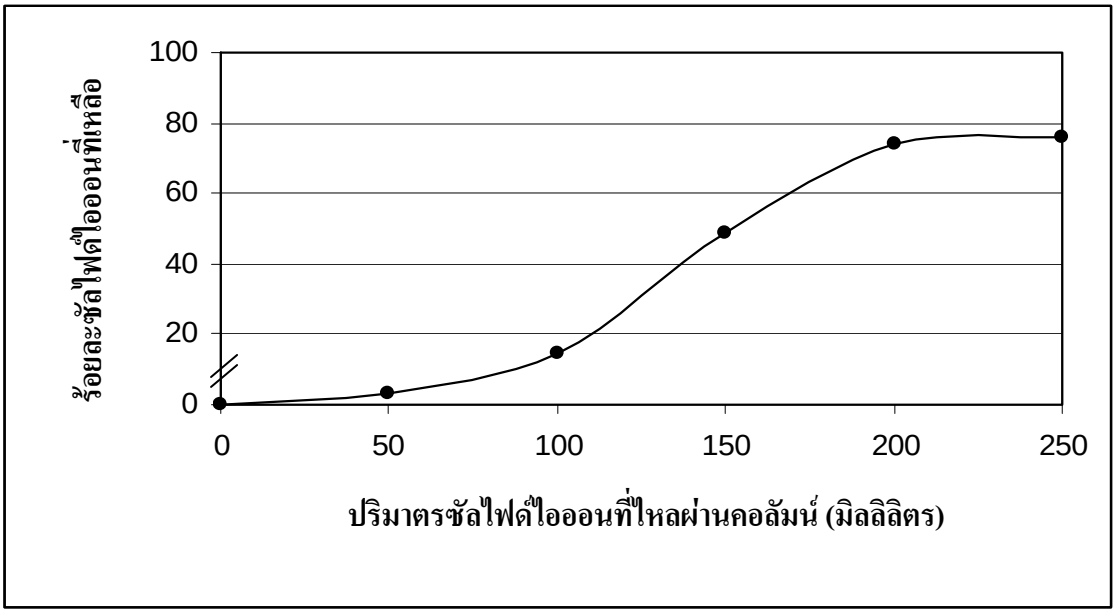
6.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำการปรับค่า พีเอช เท่ากับ 4 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะครีลิกขนาดเส้นผ่านกลาง 1.5 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุสลัดจ์ จำนวน 20 กรัม แล้วเก็บสารละลาย

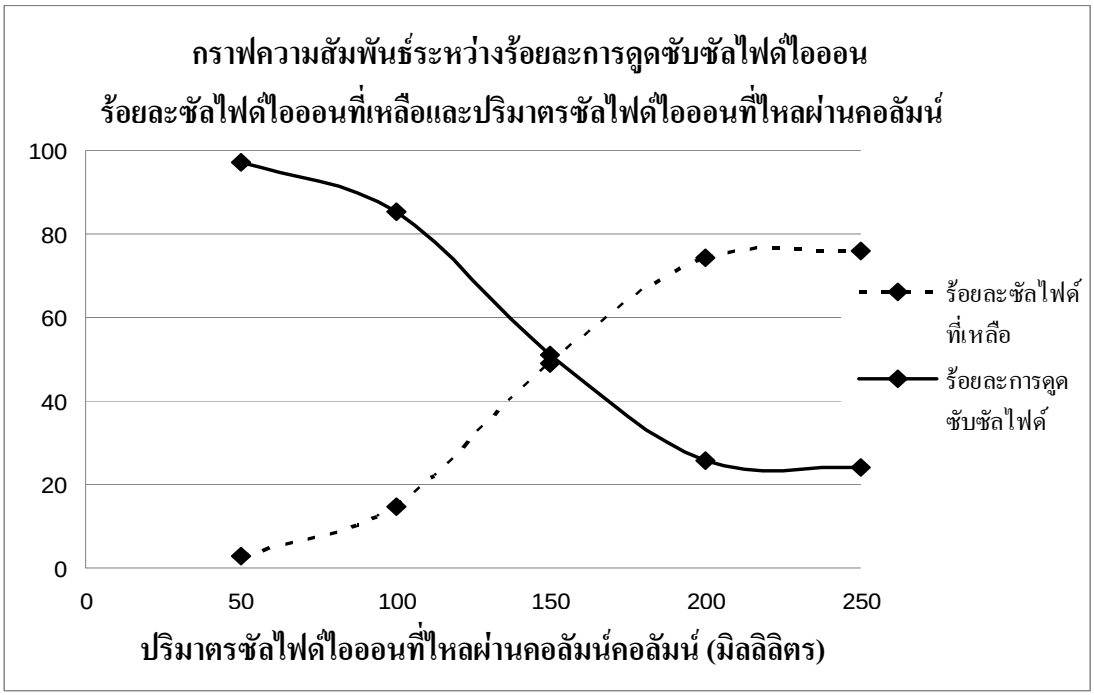
มาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน จากทางออกทุกปริมาตร 50 มิลลิลิตร จนครบอายุการใช้งาน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรของน้ำเสีย (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับ	ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ
0	0	0
50	96.86	3.14
100	85.21	14.79
150	51.04	48.96
200	25.86	74.14
250	24.15	75.85



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลืออยู่



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือและปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

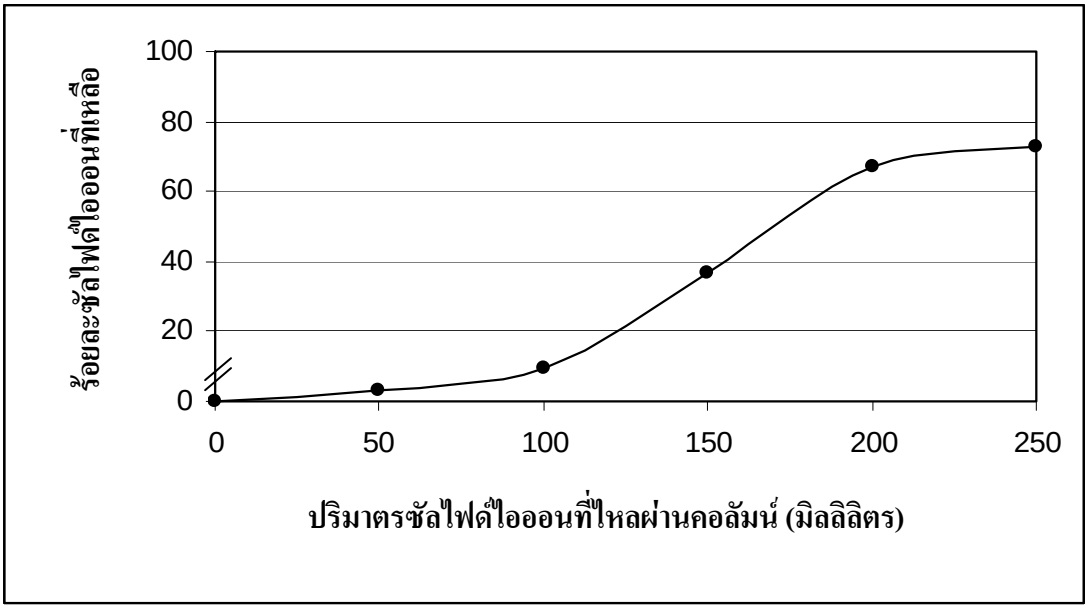
จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 ภาพที่ 28 และภาพที่ 29 พบว่า ปริมาตรสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีค่าสูง มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.86 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลืออยู่จะน้อย มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.14 แต่เมื่อระยะเวลาในการปล่อยน้ำเสียผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้นและปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนก็จะค่อยๆ ลดต่ำลง จนกระทั่งที่ปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์เป็น 250 มิลลิลิตร สลัดจ์จะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพไปจนไม่สามารถดูดซับสารละลายซัลไฟด์ไอออนได้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในช่วงแรกซัลไฟด์ไอออนได้เข้าไปเกาะอยู่ที่พื้นผิวของสลัดจ์บางส่วนแล้ว เมื่อนำน้ำเสียมากรองผ่านสลัดจ์ในครั้งต่อไป สลัดจ์ก็จะทำการดูดซับไว้จนกระทั่งเต็มพื้นที่ผิว สลัดจ์จะถึงจุดอิ่มตัวและหมดประสิทธิภาพลง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนลดลง จึงถือเป็นระยะเวลาที่สิ้นสุดการใช้งาน

6.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

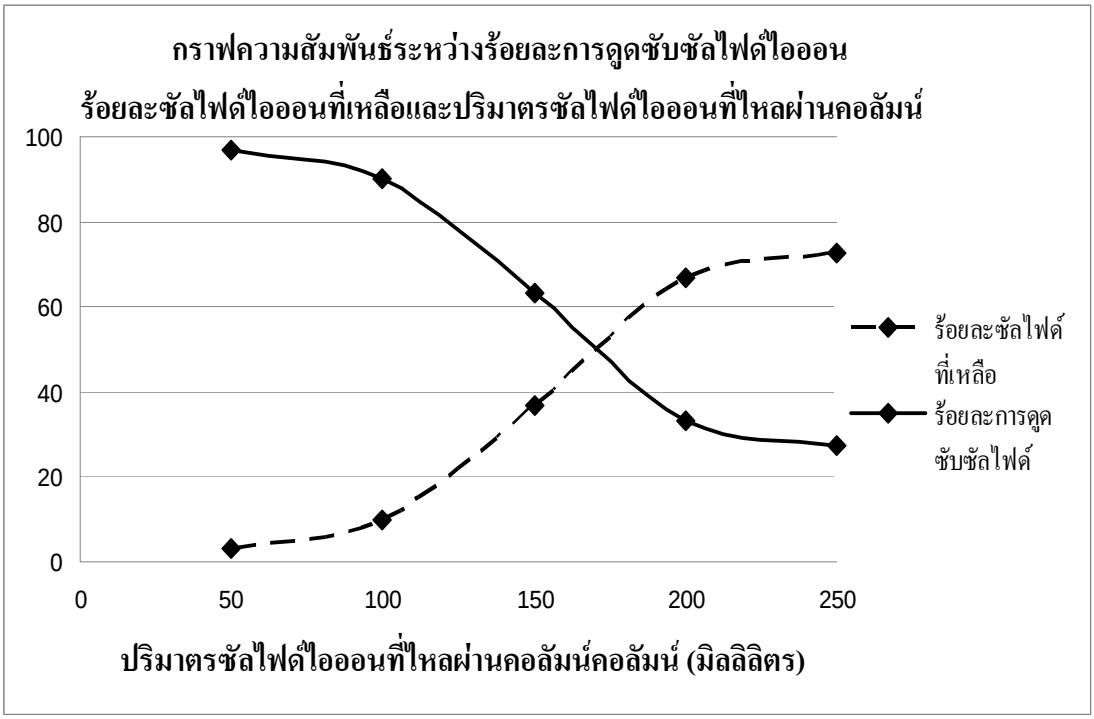
ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำการปรับพีเอช เท่ากับ 4 ไหลผ่านคอลัมน์อะครีลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุสลัดจ์ จำนวน 20 กรัม เก็บตัวอย่างสารละลายซัลไฟด์ไอออนจากทางออกทุกปริมาตร 50 มิลลิลิตร จนครบอายุการใช้งาน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรของน้ำเสีย (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับ	ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ
0	0	0
50	97.13	2.87
100	90.21	9.79
150	63.17	36.83
200	33.14	66.86
250	27.50	72.50



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลืออยู่



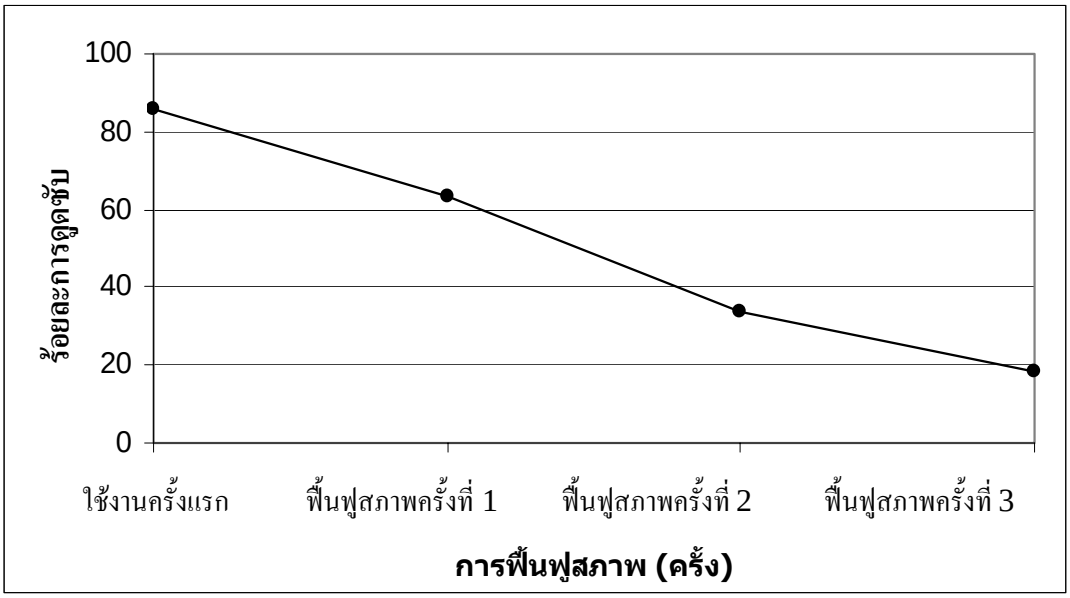
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือและปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 ภาพที่ 30 และภาพที่ 31 พบว่า ปริมาตรสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีค่าสูง มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.13 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลืออยู่จะน้อย มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.87 แต่เมื่อระยะเวลาในการปล่อยน้ำเสียผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้นและปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนก็จะค่อยๆ ลดต่ำลง จนกระทั่งที่ปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์เป็น 250 มิลลิลิตร สลัดจ์จะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพไปจนไม่สามารถดูดซับสารละลายซัลไฟด์ไอออนได้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในช่วงแรกซัลไฟด์ไอออนได้เข้าไปเกาะอยู่ที่พื้นผิวของสลัดจ์บางส่วนแล้ว เมื่อนำน้ำเสียมากรองผ่านสลัดจ์ในครั้งต่อไป สลัดจ์ก็จะทำการดูดซับไว้จนกระทั่งเต็มพื้นที่ผิว สลัดจ์จะถึงจุดอิ่มตัวและหมกประสิทธิภาพลง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนลดลง จึงถือเป็นระยะเวลาที่สิ้นสุดการใช้งาน

7. ศึกษาการฟื้นสภาพของสลัดจ์ภายหลังการใช้งาน

7.1 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี โดยผ่านการใช้งานจากคอลัมน์ และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้ว ปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 32 และตารางที่ 5



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี และการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์

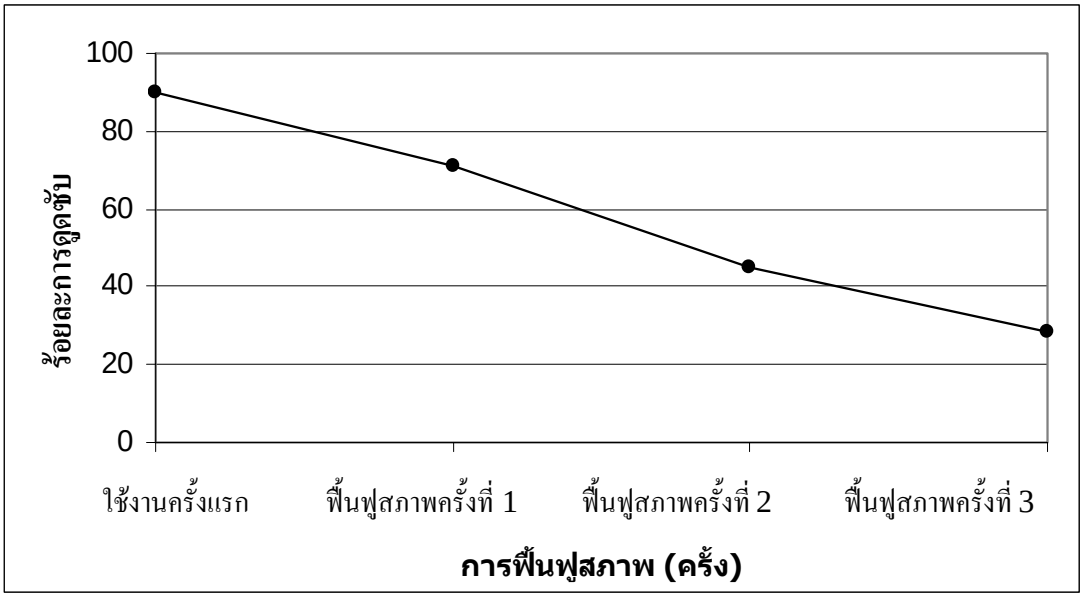
ตารางที่ 5 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี ภายหลังการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	**ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี**
ใช้งานครั้งแรก	85.59
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	63.26
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	33.80
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	18.41

จากผลการทดลองตารางที่ 5 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรีโดยผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำการฟื้นฟูสภาพ และทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซัลไฟด์ไอออน พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรีโดยที่ใช้งานครั้งแรก

7.2 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี โดยผ่านการใช้งานจากคอลัมน์ และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้ว ปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 33 และตารางที่ 6



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์

ตารางที่ 6 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ภายหลังการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

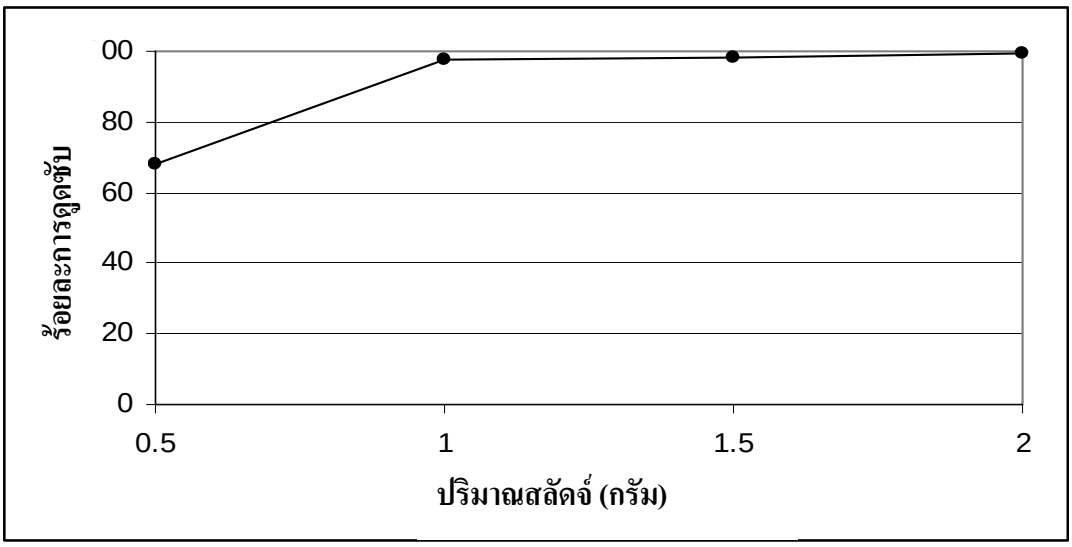
การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี
ใช้งานครั้งแรก	89.77
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	71.23
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	45.12
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	28.28

จากผลการทดลองตารางที่ 6 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรีโดยผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำการฟื้นฟูสภาพ และทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซัลไฟด์ไอออน พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรีโดยที่ใช้งานครั้งแรก

8. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์

8.1 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

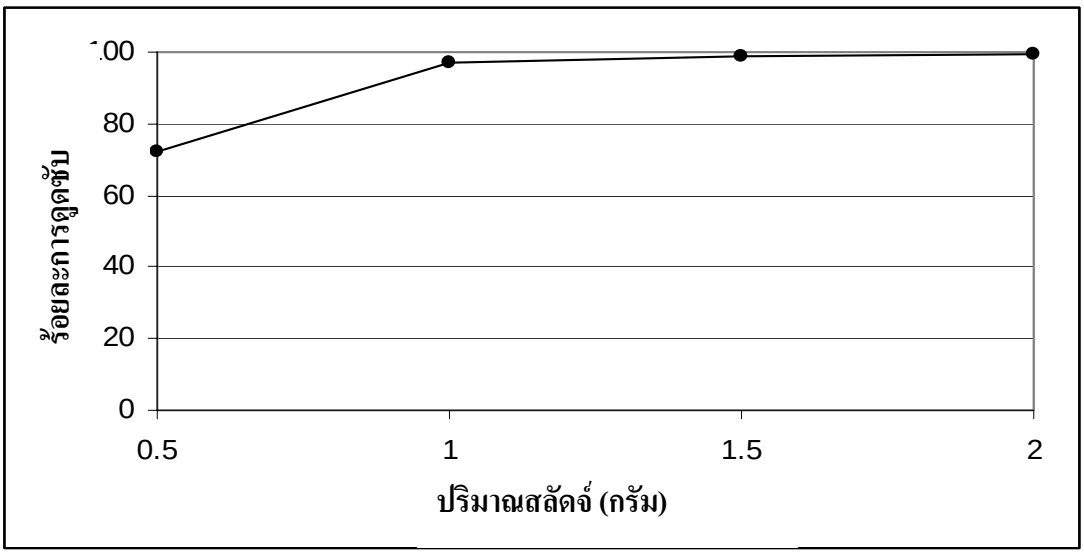
ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์ปริมาณเท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี กับความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

8.2 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายซัลไฟด์ไอออน มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์ปริมาณเท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี กับความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

9. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี

9.1 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียบริเวณจุดที่ 1 ปากซอยเดโช จุดที่ 2 สี่แยกถนนสุรพันธ์ จุดที่ 3 หน้าโรงเรียนวัดจันทราวาส และจุดที่ 4 สถานีสูบน้ำบ้านคลองยาง ซึ่งพบว่ามีซัลไฟด์ไอออนเจือปน ทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ คือ พีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (ระยะเวลาสัมผัส) และนำไปวิเคราะห์วัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode ซึ่งมีผลการทดลองตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจากท่อระบายน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

จุดเก็บตัวอย่างน้ำ	ปริมาณซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	การดูดซับ
จุดที่ 1 ปากซอยเดโช	4.41	0.52	88.21
จุดที่ 2 สี่แยกถนนสุรพันธ์	2.19	0.54	75.34
จุดที่ 3 หน้าโรงเรียนวัดจันทราวาส	0.95	0.56	41.05
จุดที่ 4 สถานีสูบน้ำบ้านคลองยาง	3.18	0.52	83.65

จากตารางที่ 7 พบว่า น้ำเสียที่เก็บจากจุดที่ 1 บริเวณปากซอยเดโช มีปริมาณซัลไฟด์เจือปนอยู่มากที่สุด คือ 4.41 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการดูดซับด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ในสภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่า ปริมาณซัลไฟด์ไอออนมีเท่ากับ 0.52 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน มีค่าเท่ากับร้อยละ 88.21 และน้ำเสียที่เก็บจากจุดที่ 3 หน้าโรงเรียนวัดจันทราวาส นั้นพบว่ามีปริมาณซัลไฟด์ไอออนเจือปนน้อยที่สุด คือ 0.95 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการดูดซับด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ในสภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่า ปริมาณซัลไฟด์ไอออนมีเท่ากับ 0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน เท่ากับร้อยละ 41.05

9.2 สลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียบริเวณจุดที่ 1 ปากซอยเดโช จุดที่ 2 สี่แยกถนนสุรพันธ์ จุดที่ 3 หน้าโรงเรียนวัดจันทราวาส และจุดที่ 4 สถานีสูบน้ำบ้านคลองยาง ซึ่งพบว่ามีซัลไฟด์ไอออนเจือปน ทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ คือ พีเอชเท่ากับ 4 ใช้สลัดจ์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (ระยะเวลาสัมผัส) และนำไปวิเคราะห์วัดหาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode ซึ่งมีผลการทดลองตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนจากท่อระบายน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรีของสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

จุดเก็บตัวอย่างน้ำ	ปริมาณซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	การดูดซับ
จุดที่ 1 ปากซอยเดโช	4.41	0.31	92.97
จุดที่ 2 สี่แยกถนนสุรพันธ์	2.19	0.56	74.43
จุดที่ 3 หน้าโรงเรียนวัดจันทราวาส	0.95	0.54	43.16
จุดที่ 4 สถานีสูบน้ำบ้านคลองยาง	3.18	0.34	89.31

จากตารางที่ 8 พบว่า น้ำเสียที่เก็บจากจุดที่ 1 บริเวณปากซอยเดโช มีปริมาณซัลไฟด์เจือปนอยู่มากที่สุด คือ 4.41 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรีในสภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่า ปริมาณซัลไฟด์ไอออนมีเท่ากับ 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 92.97 และน้ำเสียที่เก็บจากจุดที่ 3 หน้าโรงเรียนวัดจันทราวาส นั้นพบว่ามีปริมาณซัลไฟด์ไอออนเจือปนน้อยที่สุด คือ 0.95 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรีในสภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่า ปริมาณซัลไฟด์ไอออนมีเท่ากับ 0.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน เท่ากับ ร้อยละ 43.16

วิจารณ์

จากการศึกษาสภาวะในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์สองชนิด คือ สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี โดยทำการทดลองแบบแบทช์ เพื่อหาสภาวะในการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาปั่นกวน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออน ปริมาณสลัดจ์ การทดลองการดูดซับโดยผ่านคอลัมน์ การฟื้นฟูสภาพสลัดจ์หลังจากผ่านการใช้งาน และการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาทดสอบทางสถิติ (least significant different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า

1. ผลของพีเอช สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และสุพรรณบุรี ที่พีเอช 4 ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้สูงสุด เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ (least significant different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ที่พีเอช 4 ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันกับทุกค่าพีเอช ได้แก่ 3.5, 4.5, 5 และ 5 ดังตารางผนวกที่ 22

2. ผลของระยะเวลาปั่นกวน สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และสุพรรณบุรี ที่ระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้สูงสุด เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ (least significant different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ที่ระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันกับทุกระยะเวลาปั่นกวน ได้แก่ 10, 50, 70 และ 90 ดังตารางผนวกที่ 23

3. ผลของระยะเวลาสัมผัส สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และสุพรรณบุรี ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้สูงสุด เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ (least significant different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ที่ได้ได้มีความแตกต่างกันกับทุกระยะเวลาสัมผัสได้แก่ 10, 50, 70 และ 90 ดังตารางผนวกที่ 24

4. ผลของความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และสุพรรณบุรี ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ (least significant different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กับทุกระดับความเข้มข้น ได้แก่ 800, 1200, 1400 และ 1600 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางผนวกที่ 25

5. ผลของปริมาณสลัดจ์ สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และสุพรรณบุรี ที่ปริมาณสลัดจ์ 1 กรัม ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ เมื่อนำมาทดสอบทางสถิติ (least significant different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ที่ปริมาณสลัดจ์ 1 กรัม มีความแตกต่างกันกับปริมาณสลัดจ์ ได้แก่ 2, 3, 4 และ 5 แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณสลัดจ์ 0.5 กรัม ดังตารางผนวกที่ 26

6. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้ดีกว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี มีพื้นผิวสัมผัสมากกว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

7. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และเทศบาลเมืองเพชรบุรี ที่ผ่านการใช้งานแล้วหลายๆ ครั้ง มีความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นผิวของสลัดจ์บางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับก่อนจะฟื้นฟูสภาพ รวมทั้งการฟื้นฟูสภาพอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวในการดูดซับไปด้วย

8. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ไอออน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์ขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวของสลัดจ์เพิ่มขึ้น

9. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน มีประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมากกว่าประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียที่เก็บจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี เนื่องจากในน้ำเสียนั้นมีสารปนเปื้อน และโลหะหนักอื่นๆ ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งเมื่อใช้สลัดจ์ในการดูดซับ ก็จะดูดซับสารปนเปื้อนเข้าไปด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียน้อยว่าการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนอีกด้วย (แต่ความเป็นจริงแล้ว สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์จากงานวิจัยนี้ อาจจะไม่ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน โดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี เป็นตัวดูดซับ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ และคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน โดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ชนิดละ 1 กรัม สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าได้ระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และพีเอช 4 สามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้เฉลี่ยร้อยละ 88.89 และ 85.86 ตามลำดับ เมื่อนำสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี มาทำการทดลองในคอลัมน์ โดยให้ปริมาตรสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ที่ไหลผ่านคอลัมน์เท่ากัน คือ 50 มิลลิลิตร พบว่าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี สามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออน ได้ร้อยละ 97.13 และ 96.86 ตามลำดับ ผลการฟื้นฟูสภาพสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี หลังผ่านการใช้งาน พบว่า สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี มีประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ลดลงจากการใช้งานครั้งแรกตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าข้อมูลจากผลการทดลองข้างต้นมีความสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดิชและแลงเมียร์ และใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากท่อระบายน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้ ทำให้ทราบถึงข้อมูลบางอย่าง เพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ที่นี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจดังนี้

1. ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สลัดจ์จากแหล่งอื่น ๆ ในการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ที่หาได้ง่าย และยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์

2. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของสลัดจ์ในการดูดซับสารมลพิษชนิดอื่นด้วย เพื่อที่จะสามารถใช้สลัดจ์ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

3. ควรมีการศึกษาหาวัสดุอื่นที่สามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนได้เพื่อจะได้ใช้เป็นวัสดุทดแทน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กานดา ใจดี, ชัยวัฒน์ ศุภมิตรกฤษฎา และพัชรี ศรีเมือง. 2540. **การใช้ไคโตแซนและผงถ่านกัมมันต์ดูดซับสีย้อมผ้า.** ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

กานดา สธนกุลพานิช, ชูชัย ล้ออุทัย และพิสุทธิ์ อนุรัตน์. 2545. **การดูดซับฟีนอลในน้ำเสียโดยใช้เถ้าแกลบดำ.** ปริญญานิพนธ์ ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,กรุงเทพฯ.

กิตตินันท์ คงสืบชาติ. 2546. **ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวขี้เลื่อยเพื่อการดูดซับแคดเมียมในสารละลายมาตรฐาน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2542. **การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า.** พิมพ์ครั้งที่ 1. โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

ฉัตรสินี สุรเสน. 2545. **การกำจัดแคดเมียมของสารละลายมาตรฐานโดยการกรองด้วยเปลือกไข่.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชุติมา สัณหภักดี และพรพิมล พัดภู่. 2544. **การดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตแซน.** ปริญญานิพนธ์ วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

ดวงพร คันธโชติ. 2545. **นิเวศวิทยาของจุลินทรีย์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ทวีธรรม ลิมปานุภาพ และศศินี อังกานนท์ และนิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล. 2546. **การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุธรรมชาติในการดูดซับน้ำมัน.** โครงงานวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุศาสตร์โดยทุนศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์.

ธิติมา รักธรรมดี และมนตรี โฆสิตดุลย์. 2544. **การดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย ด้วยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.** ปริญญานิพนธ์ ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,กรุงเทพฯ.

นริศรา โพธิ์มูล. 2545. **การลดปริมาณตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่โดยใช้เถ้าแกลบดำ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. 2550. **หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประวิทย์ เนื่องมัจฉา และปิยวรรณ เนื่องมัจฉา. 2548. **การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้กากสาคูเป็นวัสดุดูดซับ**. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม 27 (2): 11-19.

พรรณราย รุญเจริญ. 2546. **การกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นสารดูดซับ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,กรุงเทพฯ.

ภาสกร สว่างวุฒิธรรม, ศุภโชค ชายแสน และสมชาย กองทรัพย์เจริญ. 2543. **การดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าลอย.** ปริญญานิพนธ์ ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,กรุงเทพฯ.

มนตรี จุฬาวัฒนพล, ยงยุทธ ยุทธวงศ์, ชิษณุสรร สวัสติวัตน์, ประหยัด โกมารทัต, ประพนธ์ วิไลรัตน์, สกล พันธุ์ยิ้ม และภิญโญ พินิชพันธ์. 2530. **ชีวเคมี.** ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ลาวัลย์ ศรีพงษ์. 2543. **การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า.** คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

วีระพล แต้สมบัติ. 2531. **อุทกวิทยาประยุกต์.** สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์, กรุงเทพฯ.

วันวิภา เผ่าสวัสดิ์. 2546. **การนำชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.** ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เสกสรรค์ เทพพิทักษ์. 2543. **การสะสมตะกอนในระบบรวบรวมน้ำเสียและระบบบ่อบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. 2542. **รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2540.** กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

อดิศักดิ์ อัญชลีสังกาศ. 2546. **การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายและการดูดซับด้วยเถ้าแกลบดำ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อภิสิทธิ์ เอี่ยมหน่อ. 2530. **ธรณีสันฐานวิทยา**. สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, กรุงเทพฯ.

อาภรณ์ ยิ่งยง. 2539. **การบำบัดบีโอดี และซีโอดี ในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรีโดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อุดม ก๊กผล, โสภณ เริงสำราญ และอมร เพชรสม. 2534. **อินทรีย์เคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

Eckenfelder, W.W., Jr. 1989. **Industrial Water Pollution Control**. 2nd ed (n.p.), McGraw-Hill.

Funchel, T. and T.H. Blackbun. 1979. **Bacteria and Mineral Cycling.** Academic press, London.

Maron, S.H. and C.F. Prutton. 1961. **Principles of Physical Chemistry.** 3rd ed. Macmillan, Co. New York.

Mckey, G. 1996. **Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters.** CRC Press, Inc. London.

Meyer, P.A. and N. Takeuchi. 1981**. Environmental changes in Saginaw Bay.** Lake.

Povoledo, D. and H.L. Golterman. 1972. **Humic Substrances,** Their Structure and Function in the Biosphere. Centre for Agriculture Publishing and Documentation,Wageningen.

ภาคผนวก

แสดงผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3.5	323.59	323.39	322.51	323.16	0.57	67.64
4	137.54	137.92	136.84	137.43	0.55	86.82
4.5	190.55	192.34	191.08	191.32	0.92	80.94
5	363.07	362.99	363.96	363.34	0.54	63.69
5.5	997.26	996.98	997.04	997.09	0.15	45.04

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3.5	112.39	111.98	112.01	112.13	0.23	88.74
4	103.63	103.98	103.1	103.57	0.44	89.49
4.5	131.62	131.92	130.97	131.50	0.49	86.27
5	211.39	210.48	211.79	211.22	0.67	78.22
5.5	397.1	398.03	397.94	397.69	0.51	61.09

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน โดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	371.53	372.48	371.09	371.70	0.71	62.85
30	141.25	143.01	141.79	142.02	0.90	85.87
50	213.79	212.38	213.37	213.18	0.72	78.62
70	389.04	389.99	388.01	389.01	0.99	61.09
90	426.58	425.89	425.12	425.86	0.73	57.34

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน โดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	309.03	308.98	309.98	309.33	0.56	69.09
30	107.15	106.87	107.67	107.23	0.41	89.28
50	114.82	115.04	114.03	114.63	0.53	88.08
70	144.54	144.93	143.96	144.48	0.49	85.87
90	229.08	228.98	229.64	229.23	0.36	77.09

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	417.74	416.48	417.01	417.08	0.63	53.23
30	144.54	143.34	144.02	143.97	0.60	85.55
50	199.53	198.45	199.01	199.00	0.54	80.05
70	346.74	345.89	346.98	346.54	0.57	65.33
90	602.56	601.45	602.23	602.08	0.57	39.74

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	467.74	468.03	467.01	467.59	0.53	71.81
30	144.54	144.01	143.86	144.14	0.36	88.52
50	199.53	199.02	198.04	198.86	0.76	84.15
70	346.74	346.45	347.07	346.75	0.31	77.61
90	602.56	601.98	602.86	602.47	0.45	58.31

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน

ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
800	19.49	19.5	19.02	19.34	0.27	96.11
1,000	144.54	144.98	143.85	144.46	0.57	85.54
1,200	257.03	257.98	256.89	257.30	0.59	74.25
1,400	389.04	389.57	389.98	389.53	0.47	61.09
1,600	794.32	794.96	793.73	794.34	0.62	41.94

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน

ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
800	43.57	43.99	44.04	43.87	0.26	95.73
1,000	103.92	103.35	102.02	103.10	0.98	89.28
1,200	346.74	346.01	345.94	346.23	0.44	71.10
1,400	416.87	416.24	417.03	416.71	0.42	58.31
1,600	831.76	832.05	831.54	831.78	0.26	40.59

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	301.99	301.32	302.65	301.99	0.67	69.80
1	144.54	144.92	143.87	144.44	0.53	85.54
2	44.67	44.23	43.97	44.29	0.35	95.53
3	23.88	23.68	24.32	23.96	0.33	97.61
4	17.38	17.91	16.95	17.41	0.48	98.26
5	10.47	10.98	9.98	10.48	0.50	98.95

ตารางผนวกที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	C_0	C	V (ml)	q	1/q	1/C	log q	log C
0.5	1,000	301.99	0.1	13.96	0.071633	0.003311	1.144885	2.479993
1	1,000	144.54	0.1	8.554	0.116904	0.006919	0.932169	2.159988
2	1,000	44.67	0.1	4.7765	0.209358	0.022386	0.679110	1.650016
3	1,000	33.88	0.1	3.22033	0.310527	0.029516	0.507901	1.529943
4	1,000	17.38	0.1	2.4565	0.407083	0.057537	0.390317	1.240049
5	1,000	10.95	0.1	1.979	0.505306	0.091324	0.296446	1.039414

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสลัดจ์กับร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยการดูดซับด้วยสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	331.13	330.98	331.86	331.32	0.47	66.88
1	120.23	121.97	120.91	121.04	0.88	87.90
2	74.13	74.92	73.19	74.08	0.87	92.58
3	35.48	35.99	34.89	35.45	0.55	96.45
4	23.99	23.01	22.98	23.33	0.57	97.60
5	18.62	18.45	18.92	18.66	0.24	98.13

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	C_0	C	V (ml)	q	1/q	1/C	log q	log C
0.5	1,000	331.13	0.1	13.376	0.074761	0.003020	1.126326	2.519999
1	1,000	120.23	0.1	8.79	0.113766	0.008317	0.943989	2.080013
2	1,000	74.13	0.1	4.629	0.216029	0.013490	0.665487	1.869994
3	1,000	35.48	0.1	3.215	0.311042	0.028185	0.507181	1.549984
4	1,000	23.99	0.1	2.44	0.4098361	0.041684	0.387390	1.380030
5	1,000	18.62	0.1	1.9626	0.509528	0.053706	0.292832	1.269980

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรซัลไฟด์ไอออนไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
50	31.70	30.99	31.50	31.40	0.36	3.14	96.86
100	97.50	98.12	97.97	97.86	0.32	9.79	90.21
150	368.98	368.02	367.78	368.26	0.63	36.83	63.17
200	668.34	668.56	668.99	668.63	0.33	66.86	33.14
250	724.44	725.99	724.57	725.00	0.86	72.50	27.50

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรซัลไฟด์ไอออนไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
50	29.51	28.06	28.64	28.74	0.60	2.87	97.13
100	147.91	146.82	148.90	147.87	0.85	14.79	85.21
150	489.78	490.01	489.00	489.60	0.43	48.96	51.04
200	741.31	740.98	741.87	741.39	0.37	74.14	25.86
250	758.57	759.01	757.99	758.52	0.42	75.85	24.15

ตารางผนวกที่ 15 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี โดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ใช้งานครั้งแรก	85.86	85.74	85.18	85.59	0.30
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	63.69	63.98	62.10	63.26	0.83
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	33.93	33.42	34.04	33.80	0.27
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	18.72	17.94	18.57	18.41	0.34

ตารางผนวกที่ 16 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี โดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ใช้งานครั้งแรก	89.89	89.79	89.64	89.77	0.10
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	71.82	70.49	71.38	71.23	0.55
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	45.04	45.36	44.95	45.12	0.18
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	28.22	28.54	28.07	28.28	0.20

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

ปริมาณ สลัดจ์ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	6.38	6.38	6.41	6.39	0.01	68.12
1	0.45	0.43	0.50	0.46	0.03	97.75
1.5	0.36	0.37	0.40	0.38	0.02	98.20
2	0.15	0.14	0.20	0.16	0.03	99.25

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์การดูดซับซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปริมาณสลัดจ์ จากระบบบำบัดน้ำสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

ปริมาณ สลัดจ์ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	5.51	5.49	5.51	5.50	0.01	72.43
1	0.42	0.40	0.41	0.41	0.01	97.00
1.5	0.27	0.31	0.28	0.29	0.02	98.65
2	0.10	0.20	0.12	0.14	0.04	99.50

ตารางผนวกที่ 19 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี

จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ปริมาณซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
		ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
จุดที่ 1	ครั้งที่ 1	4.44	0.51	88.57
	ครั้งที่ 2	4.40	0.57	87.05
	ครั้งที่ 3	4.39	0.48	88.21
	เฉลี่ย	4.41	0.52	88.21
จุดที่ 2	ครั้งที่ 1	2.19	0.54	75.36
	ครั้งที่ 2	2.15	0.60	72.09
	ครั้งที่ 3	2.23	0.49	78.03
	เฉลี่ย	2.19	0.54	75.34
จุดที่ 3	ครั้งที่ 1	0.95	0.59	43.33
	ครั้งที่ 2	0.91	0.48	47.25
	ครั้งที่ 3	0.99	0.62	37.37
	เฉลี่ย	0.95	0.56	41.05
จุดที่ 4	ครั้งที่ 1	3.17	0.51	84.00
	ครั้งที่ 2	3.13	0.57	81.79
	ครั้งที่ 3	3.25	0.48	85.23
	เฉลี่ย	3.18	0.52	83.65

ตารางผนวกที่ 20 การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี

จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ปริมาณซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
		ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
จุดที่ 1	ครั้งที่ 1	4.44	0.32	92.86
	ครั้งที่ 2	4.40	0.34	92.27
	ครั้งที่ 3	4.39	0.28	93.62
	เฉลี่ย	4.41	0.31	92.97
จุดที่ 2	ครั้งที่ 1	2.19	0.59	78.26
	ครั้งที่ 2	2.15	0.48	77.67
	ครั้งที่ 3	2.23	0.62	72.20
	เฉลี่ย	2.19	0.56	74.43
จุดที่ 3	ครั้งที่ 1	0.95	0.54	43.33
	ครั้งที่ 2	0.91	0.60	34.07
	ครั้งที่ 3	0.99	0.49	50.51
	เฉลี่ย	0.95	0.54	43.16
จุดที่ 4	ครั้งที่ 1	3.17	0.35	89.00
	ครั้งที่ 2	3.13	0.30	90.42
	ครั้งที่ 3	3.25	0.37	88.62
	เฉลี่ย	3.18	0.34	89.31

ตารางผนวกที่ 21 แสดงคุณภาพของน้ำเสียจากน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรี

พารามิเตอร์	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคารและชุมชน
pH	7.2	7.6	7.6	7.5	5-9
อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	30	33	33	35	ไม่ได้กำหนด
Total Hardness (มิลลิกรัม/ลิตร ของ $CaCO_3$)	300	300	260	210	ไม่ได้กำหนด
Alkalinity (มิลลิกรัม/ลิตร ของ $CaCO_3$)	128	121.5	111	131.5	ไม่ได้กำหนด
TDS (มิลลิกรัม/ลิตร)	87	209	203	110	ไม่เกิน 500
TSS (มิลลิกรัม/ลิตร)	29	0.5	>0.05	>0.05	ไม่เกิน 50
COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	507.52	295.36	83.2	120.64	ไม่เกิน 400
BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)	70	40	80	20	ไม่เกิน 200
EC	170	418	407	220	ไม่ได้กำหนด
Turbidity (NTU)	122	57	51	41	ไม่ได้กำหนด
Sufate	0.66	0.61	0.61	0.61	ไม่ได้กำหนด
Sulfide (ppm.)	4.444	2.1905	0.9524	3.1746	ไม่เกิน 1

ตารางผนวกที่ 22 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี		สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	
ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน	ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
3.5	67.64^{A}	3.5	88.74^{A}
4	86.82^{B}	4	89.49^{B}
4.5	80.94^{C}	4.5	86.27^{C}
5	63.69^{D}	5	78.22^{D}
5.5	45.04^{E}	5.5	61.09^{E}

หมายเหตุ XX^{X}: ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 23 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี		สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	
ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน	ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
10	62.85^{A}	10	69.09^{A}
30	85.87^{B}	30	89.28^{B}
60	78.62^{C}	60	88.08^{C}
90	61.09^{D}	90	85.87^{D}
120	57.34^{E}	120	77.09^{E}

หมายเหตุ XX^{X}: ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 24 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี		สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	
ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
10	53.23^{A}	10	71.81^{A}
30	85.55^{B}	30	88.52^{B}
60	80.05^{C}	60	84.15^{C}
90	65.33^{D}	90	77.61^{D}
120	39.74^{E}	120	58.31^{E}

หมายเหตุ XX^{X}: ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 25 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออนของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนทางสถิติโดยวิธี LSD

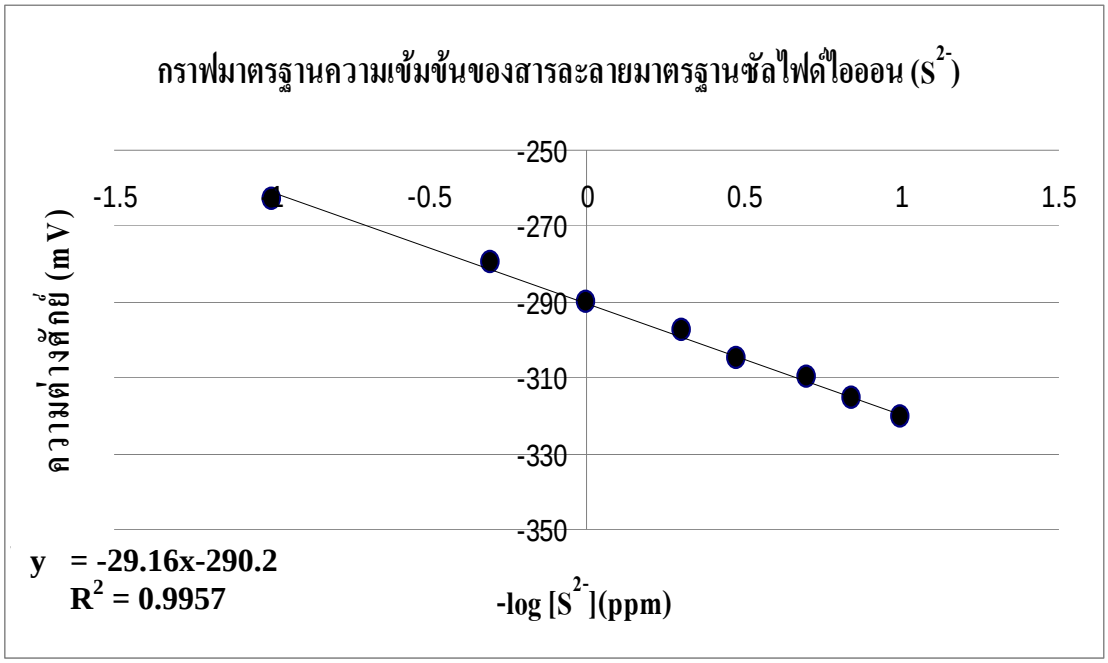
สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี		สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	
ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน	ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
800	96.11^{A}	800	95.73^{A}
1,000	85.54^{B}	1,000	89.28^{B}
1,200	74.25^{C}	1,200	71.10^{C}
1,400	61.09^{D}	1,400	58.31^{D}
1,600	41.94^{E}	1,600	40.59^{E}

หมายเหตุ XX^{X}: ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 26 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสลัดจ์ทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี		สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี	
ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน	ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออน
0.5	69.80^{A}	0.5	66.88^{A}
1	85.54	1	87.90
2	95.53	2	92.58
3	97.61	3	96.45
4	98.26	4	97.60
5	98.95	5	98.13

หมายเหตุ XX^{X}: ร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ–นามสกุล	นางสาวสุนิดา ทองโท
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 16 เมษายน 2526
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลอำนาจเจริญ
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาวิจัยที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ