



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับไอออน (II) ไอออนในสารละลายด้วยสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่าย
พวงชะโค

Adsorption of Iron (II) Ion in Solution by *Hydrilla verticillata* and *Ceratophyllum demersum*

นามผู้วิจัย นางสาวติมา สกุลงาม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วิทยา ปั่นสุวรรณ, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับไอออน (II) ไอออนในสารละลายด้วยสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด

Adsorption of Iron (II) Ion in Solution by *Hydrilla verticillata* and
Ceratophyllum demersum

โดย

นางสาวรติมา สกุดงาม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิต)

พ.ศ. 2551

รติมา สกุลงาม 2551: การดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนในสารละลายด้วยสาหร่ายหาง
กระรอกและสาหร่ายพวงกะโศก ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.
106 หน้า

ไอร์ออน (II) ไอออนที่เหลือจากการดูดซับจากผงสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวง
กะโศก ถูกตรวจวัดในรูป $\text{tris}(1,10\text{-phenanthroline})\text{iron(II)}$ ด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีที่ความยาว
คลื่น 510 นาโนเมตร และได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช (4-13) ระยะเวลา
ปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของไอร์ออน (II) ไอออน (100-500 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ
ปริมาณของตัวดูดซับ (10-100 กรัมต่อลิตร) นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการดูดซับสอดคล้องกับ
สมการไอโซเทอรัมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช นำสภาวะที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการ
ดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจากโรงงานผลิตรถยนต์ และโรงงานผลิตอิเล็กทรอนิกส์

Ratima Sagulngam 2008: Adsorption of Iron (II) Ion in Solution by *Hydrilla verticillata* and *Ceratophyllum demersum*. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 106 pages.

The remained iron (II) ion after its adsorptive extraction from *Hydrilla verticillata* and *Ceratophyllum demersum* can be determined by spectrophotometrically at 510 nm as tris(1,10-phenanthroline) iron(II). The effects of pH (4-13), shaking time or digestion time, contact time, concentration of iron (II) ion (100-500 mg/L) and amount of adsorbent (10-100 g/L) are reported. In addition, the adsorption process is conformed with Langmuir and Freundlich behaviour. The system has been applied to the determination of iron (II) ion in wastewater from an automobile and electronic factory.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ดร.นิพนธ์ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ดร.วิทยา ปิ่นสุวรรณ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณ คุณภทรมน โสกันธิกาเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิทยาลัยสิ่งแวดล้อมที่ช่วยเหลือ ให้ความรู้ในการวิเคราะห์หาคุณภาพน้ำ และขอขอบคุณบริษัทต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บน้ำเสียตัวอย่างมาใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อประเวทย์ และคุณแม่เรณู สกุลงาม ผู้ซึ่งให้ชีวิต จิตวิญญาณ สติปัญญา ปลูกฝังสร้างพื้นฐานเรื่องความรักในการศึกษา ความอดทน และเป็นกำลังใจให้โดยตลอดมา ทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ ไปได้ด้วยดี รวมทั้งสนับสนุนเกือบทุกอย่างอย่างตลอดมา รวมถึงขอขอบคุณเพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 30 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังใจและกำลังใจในการศึกษาวิจัยทดลอง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงาน หรือบุคคลที่เกี่ยวข้อง ผู้ศึกษาขอมอบคุณความดีทั้งปวงให้แก่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

รติมา สกุลงาม

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	90
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อมูลแสดงคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของเหล็ก	6
2	ผลที่ได้จากการทดสอบเหล็กเฟอร์รัสและเหล็กเฟอร์ริก	9
3	ส่วนประกอบทางเคมีของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโค	17
4	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี	24
5	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนคลิช ในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโค	72
6	การดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจากบริษัทผลิตรถยนต์และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ ของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโค	81
ตารางผนวกที่		
1	ค่าพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	91
2	ค่าพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงพะโค	92
3	ปริมาณสาหร่ายหางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน	92
4	ปริมาณสาหร่ายพวงพะโคกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน	93
5	ระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	93
6	ระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงพะโค	94
7	ระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	94
8	ระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงพะโค	95
9	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสาหร่ายหางกระรอก	96
11 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด	96
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสาหร่ายพวงชะโด	97
13 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละไอร์ออน (II) ไอออนที่เหลือ และร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	97
14 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละไอร์ออน (II) ไอออนที่เหลือ และร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด	98
15 การดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	98
16 การดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโดโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	99
17 ปริมาณสาหร่ายหางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน 30 มิลลิกรัม/ลิตร	99
18 ปริมาณสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน 30 มิลลิกรัม/ลิตร	100
19 การดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจาก บริษัทผลิตรถยนต์ และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ของสาหร่ายหางกระรอก	100
20 การดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจาก บริษัทผลิตรถยนต์ และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ของสาหร่ายพวงชะโด	101
21 แสดงคุณภาพของน้ำตัวอย่างจาก บริษัทผลิตรถยนต์ A, B, C และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์	101
22 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD	102
23 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายทางสถิติโดยวิธี LSD	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
24	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD	103
25	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD	104
26	แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนทางสถิติโดยวิธี LSD	104
27	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสำหรับ ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน 30 มิลลิกรัม/ลิตร ทางสถิติโดยวิธี LSD	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สถานะต่างๆ ของเหล็กที่อยู่ในน้ำ	5
2	สาหร่ายหางกระรอก <i>Hydrilla verticillata</i>	14
3	สาหร่ายพวงกะโศ <i>Ceratophyllum demersum</i>	16
4	กลไกการดูดซับของสารดูดซับ	19
5	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	20
6	แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ	22
7	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	23
8	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	25
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	28
10	กราฟความเข้มข้นระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	30
11	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	31
12	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	31
13	กราฟแสดงความเข้มข้นระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$	32
14	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง	34
15	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องในขั้นครึ่ง	35
16	สาหร่ายหางกระรอกบดเป็นผงเพื่อใช้ในการทดลอง	44
17	สาหร่ายพวงกะโศบดเป็นผงเพื่อใช้ในการทดลอง	45
18	การเกิดปฏิกิริยาของไอร์ออน (II) ไอออน กับ 1,10-phenanthroline monohydrate	47
19	สีของสารประกอบ tris(1,10-phenanthroline)iron(II) เพิ่มตามความเข้มข้นของไอร์ออน (II) ไอออน	47
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	56
21	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงกะโศ	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาหร่ายหางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออน	58
23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออน	59
24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	60
25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด	61
26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	62
27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด	63
28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	64
29 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สาหร่ายหางกระรอก	66
30 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของฟรุนดลิชโดยใช้สาหร่ายหางกระรอก	67
31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด	68
32 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สาหร่ายพวงชะโด	70
33 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของฟรุนดลิชโดยใช้สาหร่ายพวงชะโด	71
34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก	74
35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละไอร้อน (II) ไอออนที่เหลือ ของสาหร่ายหางกระรอก	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออน และร้อยละไอรีออน (II) ไอออนที่เหลือ ของสารร้ายทางกระรอก	75
37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนของสารร้ายพุงชะโด	76
38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละไอรีออน (II) ไอออนที่เหลือ ของสารร้ายพุงชะโด	77
39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออน และร้อยละไอรีออน (II) ไอออนที่เหลือ ของสารร้ายพุงชะโด	77
40 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพสารร้ายทางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออน	78
41 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพสารร้ายพุงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออน	79
42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารร้ายทางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร	80
43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารร้ายพุงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	Biochemical oxygen demand
COD	=	Chemical oxygen demand
EC	=	Electrical conductivity
TSS	=	Total suspended solid
TDS	=	Total dissolved solid

การดูดซับไอออน (II) ไอออนในสารละลายด้วยสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพวงกะโศก

Adsorption of Iron (II) Ion in Solution by *Hydrilla verticillata* and *Ceratophyllum demersum*

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการขยายตัวของชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการนำน้ำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ สาเหตุหลักของปัญหาจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมาจากการปล่อยน้ำเสียโดยไม่ผ่านการบำบัด หรือผ่านระบบบำบัดที่ไม่ได้รับการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ สารเคมีอันตราย ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมถึงเกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำด้วย ส่งผลให้คุณภาพน้ำเสื่อมไปจากเดิมจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โลหะหนักบางชนิดที่กำลังเป็นปัญหาและได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้ ได้แก่ การปนเปื้อนของเหล็กจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสี รถยนต์ เครื่องปั้นดินเผา เทปบันทึกเสียง อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ถึงแม้ว่าโลหะเหล็กจะมีอันตรายต่อมนุษย์ไม่รุนแรงถึงชีวิต แต่ปริมาณการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำซึ่งนับวันจะเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง และหาหนทางในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะเหล็กปนเปื้อนให้มีปริมาณเหล็กต่ำกว่าหรืออยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

เหล็กจัดเป็นโลหะที่สามารถละลายอยู่ในน้ำได้หลายรูป ทั้งในรูปสารละลาย คอลลอยด์ หรือสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอื่น ปริมาณเหล็กที่สูงมากๆ อาจก่อปัญหาการปนเปื้อนน้ำบาดาลบนเสื้อผ้า ทั้งยังทำให้รสชาติของน้ำดื่มเปลี่ยนไป เกิดสีน้ำรังเกียจในน้ำดื่ม มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก หรือ WHO กำหนดให้มีเหล็กในน้ำดื่มไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (Cohen, 1995) สำหรับในด้านการบำบัดน้ำเสียไม่พบว่ามีข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับเหล็กในประเทศไทย วิธีการกำจัดเหล็กในน้ำเสียมีหลายวิธี ล้วนมีข้อดีข้อเสียต่างๆ กันไป ได้แก่ การสกัดด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery), การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis), การบำบัดโดยง่าย และเมื่อเกิดการสลายตัวแล้ว สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารแก่พืช และยังช่วยปรับปรุง

คุณสมบัติต่างๆ ของดินให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย ซึ่งโครงการนี้ใช้ โอโซน(Ozonation), การแลกเปลี่ยนประจุผ่านเมมเบรน (Charged Membrane), การกรองโดยใช้ ริงสิยูวี (Ultrafiltration), การสกัดคืนโดยการระเหย (Evaporation Recovery), การแลกเปลี่ยน ไอออน (Ion Exchange), การตกตะกอนคอลลอยด์ (Coagulation), อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis), การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction), พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetlands), การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งการกำจัดโลหะหนักจัดเป็นระบบบำบัดขั้นที่ 3 (Tertiary treatment) หลายวิธี จะมีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งควบคุม รักษายาก (ฉัตรไชย, 2539) ดังนั้น หากสามารถพัฒนาวิธีการบำบัดโลหะหนักโดยนำกากของเสียหรือวัสดุดูดซับจากธรรมชาติมาใช้ให้เกิด ประโยชน์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำกว่าก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียได้ อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการกำจัดไอร่อน (II) ไอออน ด้วยวิธีการดูดซับ (Adsorption) โดยใช้สาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลกเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากสาหร่ายทั้งสองชนิดนี้เป็น สาหร่ายที่สามารถพบได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีความลึกไม่มากนัก นอกจากนี้ยังจัดได้ว่า สาหร่ายทั้งสองชนิดนี้เป็นวัชพืชน้ำ เมื่อมีการแพร่กระจายมากเกินไป ทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจน เมื่อสาหร่ายตาย ดังนั้น การนำสาหร่ายมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการ นำวัสดุที่เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักอีก ด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอรื้ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพวงชะโด
2. เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการดูดซับไอรื้ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพวงชะโด
3. เพื่อนำสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดที่ได้ทราบปัจจัยของสภาวะที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับไอรื้ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ และอิเล็กทรอนิกส์

การตรวจเอกสาร

1. เหล็ก (Iron)

1.1 ชนิดและคุณสมบัติของเหล็ก (มานพ, 2545)

1.1.1 สินแร่เหล็ก (Iron Ores)

เหล็กในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น ออกไซด์ (Oxide), คาร์บอเนต (Carbonate), ซิลิเกต (Silicates), ซัลไฟด์ (Sulfides) และเหล็กไพไรต์ (Iron Pyrites) ชนิดของสินแร่เหล็กสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1) ฮีมาไทต์ (Haematite) เป็นเฟอร์ริกออกไซด์ของเหล็ก (Ferric Oxide) มีสูตรทางเคมีเป็น Fe_2O_3 ถ้าบริสุทธิ์จะมีเหล็ก 69.94% และออกซิเจน 30.06% มีสีแดง ดำ และเทา เป็นสินแร่เหล็กที่มีมากที่สุด และมีความสำคัญทางอุตสาหกรรมมากที่สุด

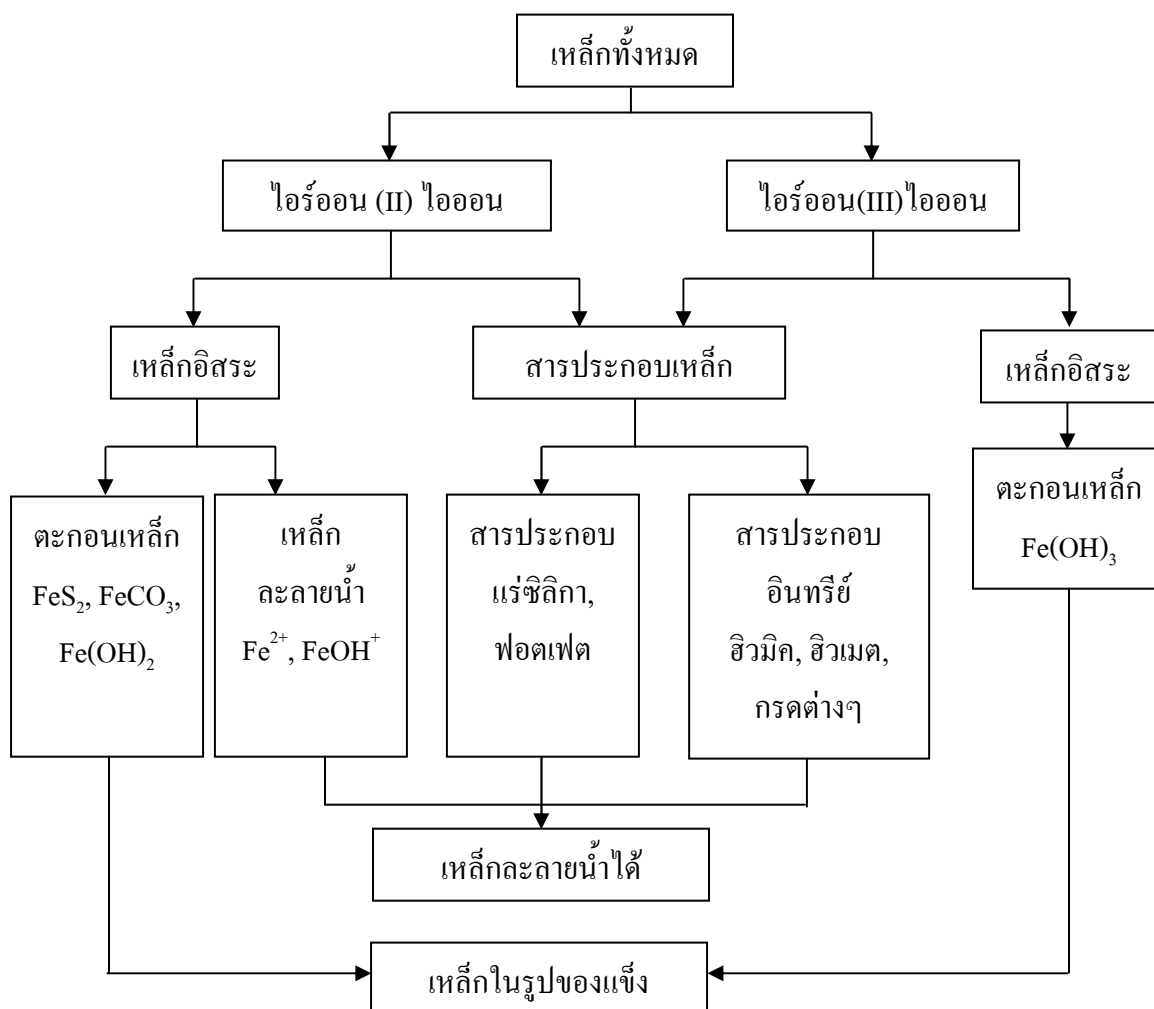
2) แมกนีไทต์ (Magnetite) เป็นเฟอร์โรโซเฟอร์ริกออกไซด์ของเหล็ก (Ferrosoferric oxide) สูตรทางเคมีเป็น Fe_3O_4 ถ้าบริสุทธิ์จะมีเนื้อเหล็กมากที่สุด คือ 72.4% และมีออกซิเจน 27.6% มีสีดำ และเทา คุณแม่เหล็กอย่างแรง เป็นสินแร่ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปปราศจากฟอสฟอรัสและกำมะถัน

3) ลิโมนาइट (Limonite) ประกอบด้วยเหล็ก 40-50% และมีน้ำ 10-20% อยู่ในรูปของ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ มีสีเหลือง แดง ดำ

4) ซิเดไรต์ (Siderite) เป็นเหล็กคาร์บอน สูตรทางเคมีเป็น FeCO_3 ประกอบด้วยเหล็ก 48.2% และคาร์บอนไดออกไซด์ 51.8% มีสีขาว เทา แดง

ส่วนสินแร่เหล็กชนิดอื่นมีน้อย แร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ได้แก่ ฮีมาไทต์ แมกนีไทต์ และลิโมนาइट

ในน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่ โดยเฉพาะในน้ำใต้ดินจะพบเหล็กอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งเหล็กในน้ำใต้ดินมักจะอยู่ในรูปละลายน้ำ เนื่องจากขาดออกซิเจน โดยอยู่ในรูปของไอร์ออน (II) ไอออน เช่น ไอร์ออน(II)ไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) ไอร์ออน(II)ซัลเฟต (FeSO_4) และไอร์ออน (II)คลอไรด์ (FeCl_2) เมื่อนำน้ำบาดาลมาสัมผัสกับออกซิเจนน้ำจะขุ่น เนื่องจากไอร์ออน (II) ไอออน ถูกออกซิไดซ์เป็นไอร์ออน(III)ไอออน ซึ่งไม่ละลายน้ำ เช่น ไอร์ออน(III)ไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) เป็นต้น (Viswanathan, 1991) เหล็กที่พบในน้ำผิวดินอาจเป็นเหล็กอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กที่อยู่ร่วมกับสารอินทรีย์ซึ่งเกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยความสามารถในการละลายน้ำของเหล็กจะขึ้นอยู่กับค่าของพีเอช ซึ่งค่าพีเอชต่ำจะมีความสามารถในการละลายได้ดีกว่าพีเอชสูง



ภาพที่ 1 สถานะต่างๆ ของเหล็กที่อยู่ในน้ำ

ที่มา: วารจกนา (2539)

1.1.2 คุณสมบัติของเหล็ก

คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของเหล็กแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลแสดงคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของเหล็ก

คุณสมบัติทางกายภาพ	ค่ามาตรฐาน
เลขอะตอม	26
น้ำหนักอะตอม	55.85
ความหนาแน่น (20 °C)	7.873 กรัมต่อตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิหลอมเหลว	1,535 องศาเซลเซียส
จุดเดือดกลายเป็นไอ	3,000 องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (0-100 °C)	65 แคลอรีต่อกรัม
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	1,598 แคลอรีต่อกรัม

ที่มา: จงรักษ์ (2539)

1.1.3 ปฏิกิริยาเคมีของเหล็ก จะเกิดขึ้นดังนี้

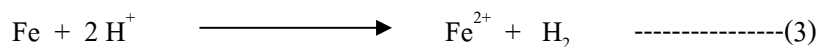
1) ปฏิกิริยาในอากาศที่อุณหภูมิปกติ เหล็กจะมีความเสถียรในอากาศที่แห้ง ไม่มี ความชื้น เมื่อให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา และให้เฟอร์ไรต์ออกไซด์ (Fe_3O_4)



2) ปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิปกติ เหล็กจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำถ้าไม่มีออกซิเจน ในอากาศที่มีน้ำและออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสนิมเหล็กขึ้น เหล็กที่เผาจนแดงจะทำปฏิกิริยากับ ไอน้ำให้เฟอร์ไรต์ออกไซด์ (Fe_3O_4) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2)



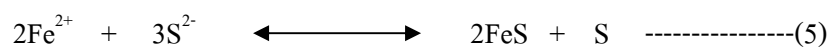
3) ปฏิกริยากับกรด เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางที่ร้อน จะให้เกิดไอออนเฟอร์รัส (Ferrous Salt, Fe^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2)



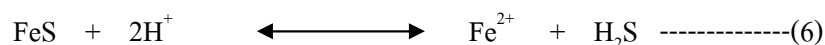
1.1.4 ไอร์ออน (II) ไอออน และไอร์ออน(III)ไอออน

ปกติเหล็กที่บริสุทธิ์จะมีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้น ในธรรมชาติมักพบเหล็กในรูปของไอร์ออน (II) ไอออน หรือไอร์ออน(III)ไอออน ซึ่งมีเสถียรภาพสูงกว่า ไอร์ออน (II) ไอออนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยไอน้ำเกิดเป็นไอร์ออน(III)ไอออนได้ง่าย เมื่อนำไอร์ออน (II) ไอออนและไอร์ออน(III)ไอออน มาทำปฏิกิริยากับกรดจะได้สารละลายของไอร์ออน (II) ไอออนที่มีสีเขียวอ่อน ส่วนสารละลายไอร์ออน (II) ไอออนจะมีสีเหลือง โดยปฏิกิริยาของไอร์ออน (II) ไอออน และไอร์ออน(III)ไอออน มีดังนี้

1) ปฏิกริยากับสารละลายซัลไฟด์ ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) จะตกตะกอนกับสารละลายของไอร์ออน (II) ไอออน และไอร์ออน(III)ไอออน ให้ตะกอนสีดำของเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ในสารละลายเบส

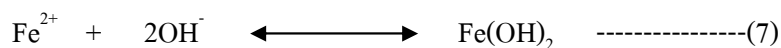


ซัลไฟด์ของเหล็กจะละลายในกรดไฮโดรคลอริก

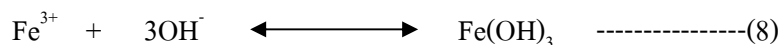


ดังนั้นในสารละลายกรดจะไม่สามารถตกตะกอนซัลไฟด์ได้

2) ปฏิกริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และแอมโมเนีย โดยจะเกิดตะกอนกับสารละลายของเหล็กไอร์ออน (II) ไอออนให้ตะกอนลักษณะคล้ายวุ้นสีขาวของไอร์ออน(II)ไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$)

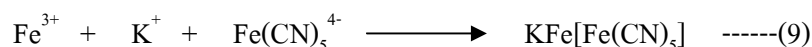


ไอออน(III)ไอออนจะเกิดตะกอนกับไฮดรอกไซด์ ให้ตะกอนลักษณะคล้ายน้ำตาลของไอออน(III)ไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)_3) (Snoeyink, 1980)



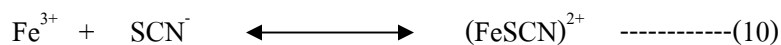
ตะกอนของไอออน(III)ไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)_3) จะละลายน้ำได้น้อยกว่าไอออน (II) ไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)_2) แต่จะละลายได้ดีในสารละลายกรดทั้งคู่

3) ปฏิกริยากับโพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ (Potassium Ferrocyanide) จะเกิดตะกอนกับไอออน (III) ไอออน ให้ตะกอนสีน้ำเงินเข้มที่มีความเสถียร

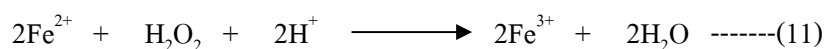


กับไอออน (II) ไอออนให้ตะกอนสีขาว ถ้าทิ้งไว้ในอากาศตะกอนจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม

4) ปฏิกริยากับโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (Potassium Thiocyanate) จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีแดงเลือดนกกับไอออน(III)ไอออน



5) การถูกออกซิไดซ์และถูกรีดิวซ์ ไอออน (II) ไอออนจะถูกออกซิไดซ์เป็นหลัก เฟอร์ริกไคลด์ในอากาศ นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในกรด เช่น กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) ก็สามารถเปลี่ยนไอออน (II) ไอออนเป็นไอออน(III)ไอออนได้ ดังสมการที่ 11 ส่วนไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สแตนนัสคลอไรด์ (SnCl_2) และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) สามารถรีดิวซ์ไอออน(III)ไอออนเป็นไอออน (II) ไอออนได้ภายใต้สภาวะกรด ดังสมการที่ 12





การทดสอบไอร่อน (II) ไอออน และไอร่อน(III)ไอออน สามารถทดสอบได้ดัง
ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลที่ได้จากการทดสอบไอร่อน (II) ไอออน และไอร่อน(III)ไอออน

สารที่ใช้ในการทดสอบ	ผลที่ได้จากการทดสอบ	
	ไอร่อน (II) ไอออน	ไอร่อน(III)ไอออน
แอมโมเนียมหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์	ตะกอนสีขาว เมื่อทิ้งไว้ในอากาศ จะเปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาล	ตะกอนสีน้ำตาล
โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน เฟอร์เรต (II)	ตะกอนสีขาว เมื่อทิ้งไว้ในอากาศ จะเปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำเงิน	ตะกอนสีฟ้าอมม่วง
โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน เฟอร์เรต (III)	ตะกอนสีน้ำเงินเข้ม	สารละลายสีแดงอ่อนปน น้ำตาล
โพแทสเซียมไซโอไซยานเนต	-	สารละลายสีแดงเลือดนก

ที่มา: จงรักษ์ (2539)

1.2 ประโยชน์ของโลหะเหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์เป็นเวลา 4,000 ปี ล่วงมาแล้ว
เหล็กเป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอื่น เพราะสินแร่ของเหล็กมีอยู่มากบน
พื้นโลก คือ ประมาณ 4.5% เนื่องจากเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง เหนียว จึงสามารถนำไปทำเป็นรูป
ต่างๆ ได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของสี ผลิตภัณฑ์
บ้าน สีย้อมผ้า สีเคลือบในงานเครื่องปั้นดินเผา ส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ในอุตสาหกรรม

ทำกระดาษและพลาสติก อุตสาหกรรมทำเทปบันทึกเสียง ทำส่วนประกอบคอมพิวเตอร์
อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (วรวรรณ, 2544)

1.3 ปัญหาของเหล็ก

เนื่องจากปริมาณเหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำทั่วไปมักมีปริมาณที่ไม่สูงนัก แต่ปริมาณเหล็ก
ที่มีสูงมากๆ อาจก่อปัญหาต่างๆ ดังนี้

1.3.1 ปัญหาด้านการอุปโภคบริโภค

น้ำที่มีเหล็กปนเปื้อนอยู่มากจะทำให้เกิดแบคทีเรียเหล็ก ซึ่งมีลักษณะเป็นวุ้นสี
แดงเข้ม เมื่อมีจำนวนมากจะก่อให้เกิดการอุดตันตามท่อในระบบจ่ายน้ำ (Sawyer, 1989) ลักษณะน้ำ
ที่มีเหล็กมากจะมีสีเหลืองหรือสีแดงและมีกลิ่นสนิมเหล็ก ซึ่งเป็นที่น่ารังเกียจต่อการนำน้ำมาใช้ในการ
บริโภค ทั้งยังทำให้รสชาติของน้ำดื่มเปลี่ยนไป (วิวัฒนา, 2540) แต่ถ้านำไปใช้ในการอุปโภค
เช่น การซักล้าง เหล็กก็จะเกาะติดกับภาชนะและผ้าที่ซักทำให้มีสีเหลืองหรือแดง นอกจากนี้ได้มีการ
ทดลองในสหรัฐอเมริกา โดยการนำเอาน้ำที่มีเหล็กเกิน 10 มิลลิกรัม/ลิตร ไปล้างไขปรากฏว่า
ไขจะเน่าเสียเร็วกว่าปกติ (Vitayaudom, 1987)

1.3.2 ปัญหาด้านสุขภาพอนามัย และความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต

เหล็กเป็นธาตุที่จำเป็นในอาหารของมนุษย์ เนื่องจากเหล็กเป็นองค์ประกอบของ
ฮีโมโกลบิน ไมโอโกลบิน (ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่นำพาออกซิเจนไปยังส่วนต่างๆ ของร่างกาย)
ไซโตโครม เอนไซม์ และโปรตีนต่างๆ หลายชนิด เมื่อขาดธาตุเหล็กจะทำให้การสังเคราะห์
ฮีโมโกลบินลดลง ซึ่งทำให้เกิดโรคโลหิตจาง (Amaemia)

โดยปกติทั้งไอร์ออน (II) ไอออน และไอร์ออน(III)ไอออนไม่จัดว่าเป็นสารพิษ
ต่อร่างกาย แต่ถ้าร่างกายดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดไปมากเกินไปจนเกินควรจะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย
โดยเฉพาะไอร์ออน(III)ไอออนจะแสดงความเป็นพิษได้ เช่น LD₅₀ ของ anhydrous ferric chloride
ในรูปการฉีดในหนูเท่ากับ 68 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทางการกิน 400 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วน
FeCl₃·6H₂O ในรูปการฉีด LD₅₀ เท่ากับ 260 มิลลิกรัม/กิโลกรัม LD₅₀ ทางการกินของหนูในรูปสาร
Fe(NO₃)₃·9H₂O เท่ากับ 3,250 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในรูป FeSO₄ เท่ากับ 1,480 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

TD_{LO} (Toxic Dose Low) ทางปากของทารก ในรูป FeSO₄ เท่ากับ 1,480 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จะมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง สาเหตุที่พิษของเหล็กทำให้สัตว์ตาย เนื่องจากระบบหายใจล้มเหลว อาการที่พบก่อนตาย ได้แก่ กินอาหารน้อยลง ปัสสาวะน้อย ท้องร่วง น้ำหนักลด ความดันต่ำ และซึมเศร้า (George และ Florence, 2001)

อาการพิษที่แสดงในมนุษย์เมื่อร่างกายมีการดูดซึมเหล็กมากเกินไป จะทำให้ธาตุเหล็กสะสมในระดับ ตับอ่อน หัวใจ ม้าม และระบบการสร้างเม็ดเลือดในรูป Haemosiderin ทำให้เกิดอาการของโรคตับแข็ง และการตกตะกอนของธาตุเหล็กในร่างกาย (Siderosis) จะทำให้เกิดอาการปวดหัว วิงเวียน หายใจสั้นๆ เหนื่อยง่าย น้ำหนักลด อาเจียน ท้องร่วง ระคายเคือง ปวดท้อง และยังทำให้อัตราการหายใจ การไหลเวียนโลหิตเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังอาจมีอาการของโรคโลหิตจางได้ ส่วนการสะสมเหล็กเรื้อรังจะทำให้เกิดเนื้องอกได้

1.3.3 ปัญหาอื่นๆ

ธาตุเหล็กเป็นแหล่งอาหารที่ช่วยในการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ ทำให้น้ำประปามีความขุ่นสูงและมีสีแดง เกิดสนิมเหล็กเกาะติดในท่อประปา ประตุน้ำ มาตรวัดน้ำ ทำให้เกิดการอุดตันของท่อน้ำ และลดอัตราการไหลของน้ำในท่อ นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอและเส้นด้าย เยื่อกระดาษ เครื่องดื่ม และอาหาร เป็นต้น (Adam, 1990)

1.4 แหล่งที่มาของเหล็กในน้ำเสีย

โดยทั่วไปจะพบการปนเปื้อนของเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตเกี่ยวข้องกับเหล็ก เช่น โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานที่มีกระบวนการอบ ชุบ เคลือบ โลหะ เป็นต้น รวมถึง สามารถพบการปนเปื้อนของเหล็กในน้ำทิ้งจากเหมืองแร่หลายประเภท เช่น น้ำทิ้งจากเหมืองถ่านหิน เหมืองกำมะถัน เป็นต้น

2. สาหร่ายหางกระรอก

2.1 ชื่อวิทยาศาสตร์ *Hydrilla verticillata*

2.2 ชื่อสามัญ Hydrilla

2.3 ชื่อวงศ์ HYDROCHARITACEAE

2.4 แหล่งกำเนิด ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทวีปออสเตรเลีย และแอฟริกา

2.5 ลักษณะทั่วไป

ลำต้น เป็นสายเรียวยาวทอดไปตามความสูงของระดับน้ำ หรือทอดยาวไปตามแนวนานใต้ผิวน้ำ อาจยาวถึง 3 เมตร มีกิ่งก้านสาขามากมาย มีรากยึดติดกับพื้นดินใต้น้ำ ลำต้นแก่ๆ จะมีรากงอกออกจากข้อของลำต้น

ใบ ลักษณะใบเป็นแผ่นบางเรียวยาวขนาดเล็ก ขอบใบหยักเป็นซี่เล็กๆ ใบแตกจากลำต้นเป็นชั้นๆ ชั้นละ 3-8 ใบ แตกออกรอบๆ ข้อของลำต้น ไม่มีก้านใบ ความกว้างของใบประมาณ 2 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 10-15 มิลลิเมตร ใบมีสีเขียวแก่ เส้นกลางใบสีแดง

ดอก สาหร่ายหางกระรอกจัดเป็นพวก monoecious คือ มีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน ดอกแตกตามซอกใบ ดอกตัวผู้มีขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร สีขาวอมม่วง เป็นดอกเดี่ยวมีก้านดอกสั้นมาก มีกลีบดอก 3 กลีบ กลีบรอง 3 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 3 อัน เกสรตัวผู้ประกอบด้วยอับเรณู (Anther) จำนวน 4 ช่อ เมื่อเกิดใหม่ๆ จะมีกาบ (Spathe) บางๆ หุ้มส่วนของดอกไว้ทั้งหมด ดอกจะติดอยู่ที่ซอกใบใต้ระดับน้ำ เมื่อดอกแก่จะหลุดออกจาก spathe และลอยขึ้นมาบนเหนือผิวน้ำ ในขณะเดียวกันอับเรณูก็จะแตกออกปล่อยให้ละอองเรณูกระเด็นออกไปผสมกับเกสรตัวเมีย เมื่อเวลาดอกบานกลีบเลี้ยงและกลีบดอกจะกระดกลงด้านล่างทำหน้าที่พองให้เกสรตัวผู้อยู่เหนือน้ำ ส่วนดอกตัวเมียออกตามซอกใบเช่นเดียวกับดอกตัวผู้ แต่จะมีก้านดอกยาวส่งดอกขึ้นมาบนเหนือผิวน้ำ ก้านดอกยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร ตรงโคนก้านดอกตัวเมียจะมีกาบ (Spathe) บางๆ หุ้มอยู่เช่นเดียวกัน ดอกตัวเมียมีสีขาวขนาดใหญ่กว่าดอกตัวผู้ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-6 มิลลิเมตร มีกลีบดอกจำนวน 3 กลีบ กลีบเลี้ยง 3 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 3

อัน เกสรตัวเมีย 3 อัน ยอดเกสรตัวเมีย 3 อัน รังไข่มี carpel เพียง 1 ช่อง กลีบเลี้ยงและกลีบดอก
โป่งอวบน้ำ ทำให้สามารถลอยอยู่บนผิวน้ำได้ดี แม้จะเกิดกระแสน้ำดอกก็จะไม่จมน้ำ (วุฒิพร,
2538)

ผล มีขนาดเล็กรูปทรงกระบอก ภายในมีเมล็ด 5 เมล็ด

สภาพแวดล้อมอื่นๆ ในธรรมชาติมักพบในน้ำที่มีแสงสว่างส่องถึง น้ำค่อนข้างใส ใน
ระดับน้ำลึก 0.6-1.0 เมตร ลักษณะพื้นเป็นดินโคลนหรือโคลนปนทราย พีเอชของน้ำ 6.0-7.3
อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นพืชที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี
แพร่ขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว เมื่อนำมาปลูกในตู้ปลาจะมีจุดเด่นที่สีของใบจะเขียวเข้มกว่าพันธุ์ไม้น้ำ
ชนิดอื่นๆ ทำให้มีสีตัดกันเพิ่มความสวยงามได้ดี

การกระจายและนิเวศวิทยา ตั้งแต่ทวีปยุโรป แอฟริกา และเอเชีย พบตามบริเวณแหล่ง
น้ำจืดทั่วไป เช่น หนอง บึง หรือในนาข้าว หรือบริเวณที่น้ำขังและไหลไม่แรงนัก จากใกล้
ระดับน้ำทะเล ถึง 2,000 เมตร ออกดอกเดือนธันวาคม – มกราคม

วิธีการขยายพันธุ์ แพร่พันธุ์ได้ 2 วิธี คือ ตัดลำต้นปักชำ และการเพาะเมล็ด



ภาพที่ 2 สาหร่ายทางกระรอก *Hydrilla verticillata* 1. ลักษณะต้น 2. ดอกตัวผู้
3. ดอกตัวผู้ทางด้านบน 4. ดอกตัวผู้ทางด้านข้าง 5. ดอกตัวเมียเจริญเต็มที่
6. กาบหุ้มโคนก้านดอกตัวเมีย

ที่มา: ไมตรี และคณะ (2535)

3. สาหร่ายพวงพะโค

3.1 ชื่อวิทยาศาสตร์ *Ceratophyllum demersum*

3.2 ชื่อสามัญ Coontail hornwort, Common coontail

3.3 ชื่อวงศ์ CERATOPHYLLACEAE

3.4 ลักษณะทั่วไป

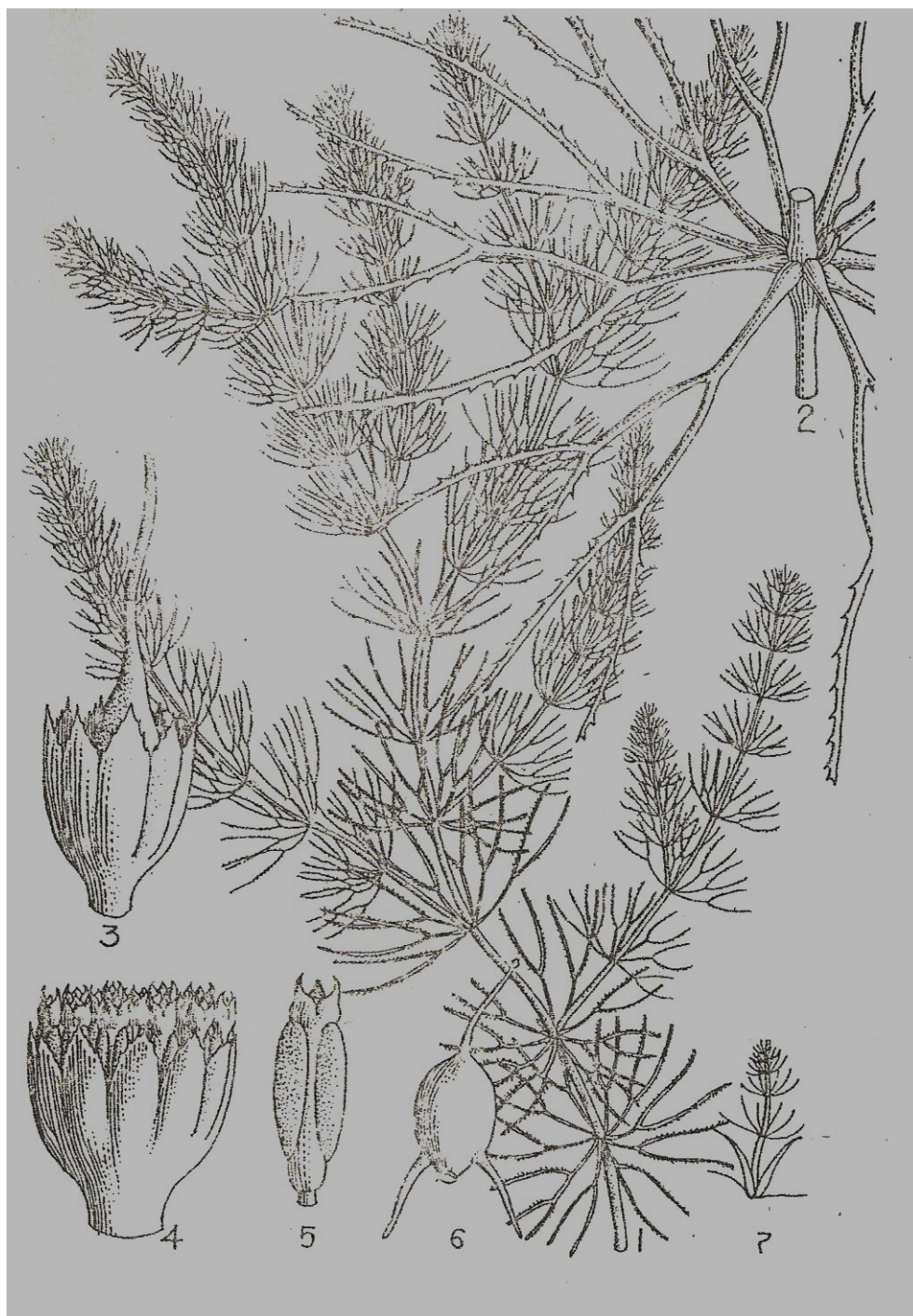
สาหร่ายพวงพะโคจัดเป็นพืชน้ำจืดที่มีอายุหลายฤดู มีต้นพอม ขาว แตกกิ่งก้านมาก จนดูเป็นกลุ่มใหญ่อยู่ใต้ผิวน้ำ ไม่มีราก

ใบเรียงรอบข้อจำนวนข้อละประมาณ 7-12 ใบ กระจายแผ่อยู่ใต้น้ำ ใบมีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายเส้นด้าย สีเขียวเข้ม ปลายใบแตกเป็นช่อ 1-2 ชั้น (อาจพบ 4 ชั้น) ทำให้เห็นตรงปลายมี 2-4 แฉก ใบยาว 1.5-4.0 เซนติเมตร ขอบใบจักแบบฟันเลื่อย ปลายใบแหลมมีความผันแปรมากในเรื่องความยาวและความหนาแน่นของใบ

ดอกเดี่ยวขนาดเล็ก แยกเพศแต่เกิดอยู่ในต้นเดียวกัน สีออกเขียว ไม่มีก้านดอก ออกที่มุมโคนก้านดอก ไม่มีส่วนที่จะจัดว่าเป็นกลีบแต่มีลักษณะเป็นเส้นจำนวน 9-15 เส้น เรียงต่อกัน ขนาดยาว 1-2 เซนติเมตร ตรงปลายจักเป็นเส้นเล็กๆ ดอกตัวผู้ประกอบด้วยเกสรตัวผู้จำนวน 8-24 อัน ติดบนก้านเดียวกันภายในวงของกลีบ เกสรตัวผู้แต่ละอันยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร อับเกสรสีขาวมี 2 ห้อง แก่แล้วแตกตามยาว ดอกตัวเมียประกอบด้วยรังไข่ที่อยู่เหนือส่วนอื่นของดอก มี 1 ห้อง มีอวุล 1 เม็ด (วุฒิพร, 2538)

ผลชนิดอะซิน รูปร่างรูปไข่สีดำ มีหนามยื่นออกไป 2 อัน ที่ฐาน

การกระจายและนิเวศวิทยา กระจายทั่วไปทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ที่ระดับใกล้น้ำทะเลจนถึง 1,500 เมตร อยู่ในน้ำลึกได้ถึง 60 เซนติเมตร มักพบขึ้นรวมอยู่กับพืชน้ำอื่นๆ เป็นอุปสรรคต่อการตกปลาและการพักผ่อน เป็นที่อาศัยที่เหมาะสมของลูกกุ้ง



ภาพที่ 3 สาหร่ายพวงกะโศ *Ceratophyllum demersum* 1. ลักษณะต้น 2. ลักษณะการติดของใบ
รอบข้อ 3. ดอกตัวเมีย 4. ดอกตัวผู้ 5. เกสรตัวผู้ 6. ผล 7. ต้นอ่อน
ที่มา: ไมตรี และคณะ (2535)

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศ

ประเภทสาหร่าย	ส่วนประกอบทางเคมี (%)					
	วัสดุแห้ง	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	เยื่อใย	ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก
สาหร่ายหางกระรอก	95.37	13.86	0.59	18.42	12.16	50.34
	100	14.53	0.62	19.31	12.75	52.79
สาหร่ายพวงกะโศ	94.60	19.78	1.59	24.86	13.39	34.98
	100	20.91	1.68	26.28	14.15	36.98

ที่มา: AOAC (2000)

หมายเหตุ ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่าย คือ แป้งและน้ำตาล

4. กระบวนการดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่าง

ของแข็งกับก๊าซ พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับขาม่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

4.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

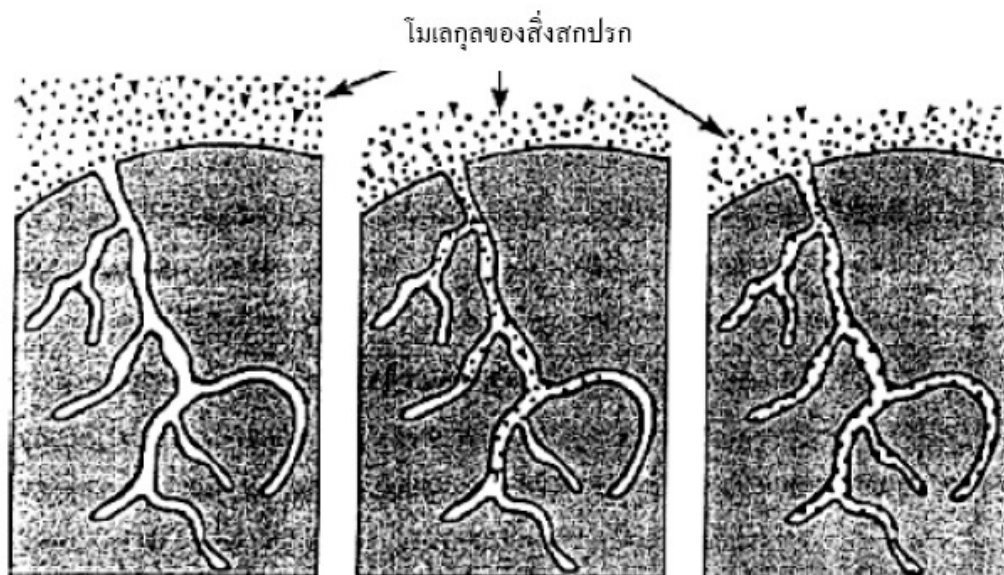
4.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

4.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

ระยะที่ 1 สิ่งสกปรกแพร่
ไปยังผิวของสารดูดซับ

ระยะที่ 2 สิ่งสกปรกเคลื่อนเข้าไป
ในรูพรุนของสารดูดซับ

ระยะที่ 3 เกิดการดูดติดผิว
ภายในรูพรุนของสารดูดซับ



ภาพที่ 4 กลไกการดูดซับของสารดูดซับ

ที่มา: สาธิตา และฤทธิรัตน์ (2546)

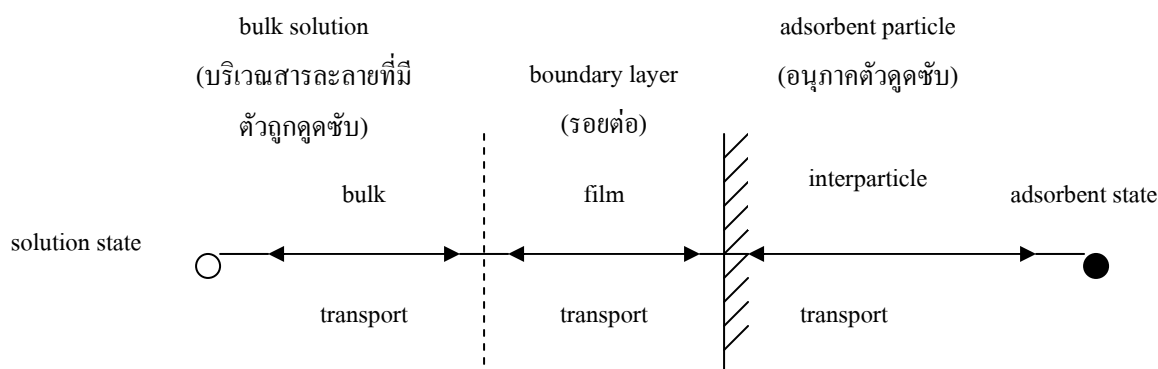
4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลาย

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้ (ภาพที่ 5)

4.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

4.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกละลายแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

4.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้อาจเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

4.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

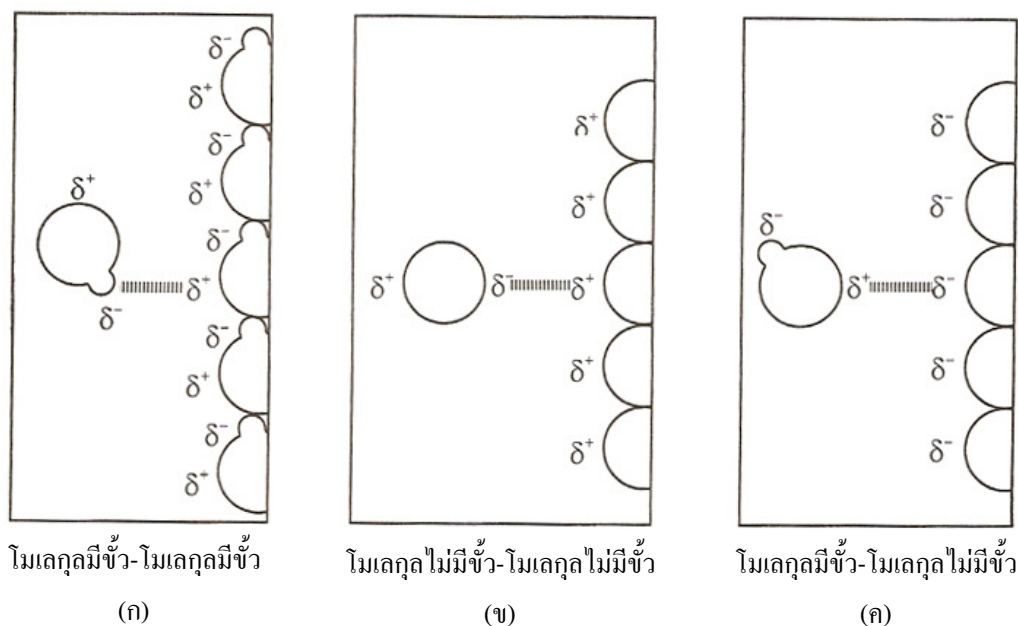
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

4.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับการดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภท ดังนี้ (ภาพที่ 6)

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่า แรงลอนดอน (london force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วอย่างชั่วคราว (induced dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหนึ่ง ขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้ โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อๆ ไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction) แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย

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

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

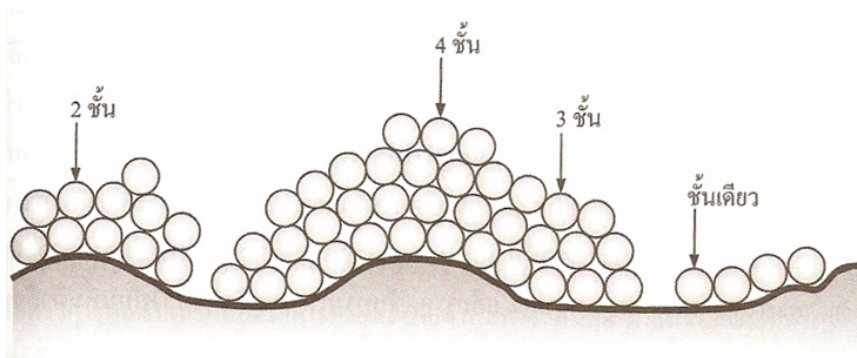


ภาพที่ 6 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ

ที่มา: สาริกา และฤติรัตน์ (2546)

4.4 รูปแบบของการดูดซับ

4.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der Waals adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกจับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 7 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

4.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

ตารางที่ 4 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50 – 400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดจากการดูดซับ	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)

4.5 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

4.5.1 สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแก้มันต์ อะลูมิเนียมแก้มันต์ ถ่านกระดูก สีนแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เช่น kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด

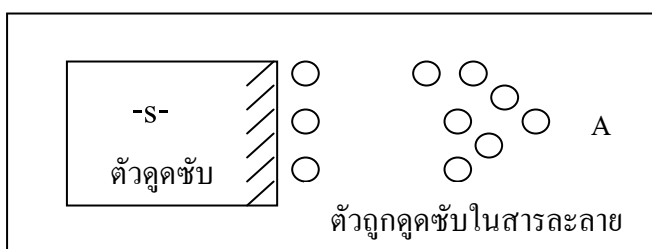
4.5.2 ถ่านแก้มันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

4.5.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

4.5.4 วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จี๊เลี้ยง ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ เถ้าแกลบดำ เป็นต้น

4.5.5 สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือรา สายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

4.6 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 8 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

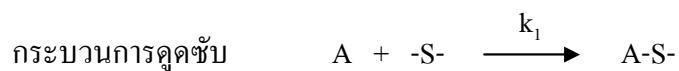
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้นตอนต้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา แต่อัตราการคายจะเกิดขึ้นน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับนี้ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตร ในสารละลาย -S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

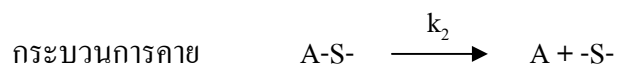
$(1 - q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบน พื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

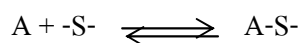
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[C] = K[C]$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad \text{----- (13)}$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



$$\text{ณ สภาวะสมดุล} \quad K = \frac{q}{C} \quad \text{----- (14)}$$

q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมล/กิโลกรัม โมล/กรัม มิลลิกรัม/กิโลกรัม

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กิโลกรัม

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลิตร

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

$$\frac{\text{ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิว}}{\text{ของตัวดูดซับ}} = \frac{\text{ปริมาณตัวถูกดูดซับที่คายออกมา}}{\text{จากตัวดูดซับ}}$$

$$qW = V(C_i - C_e) \quad \text{----- (14)}$$

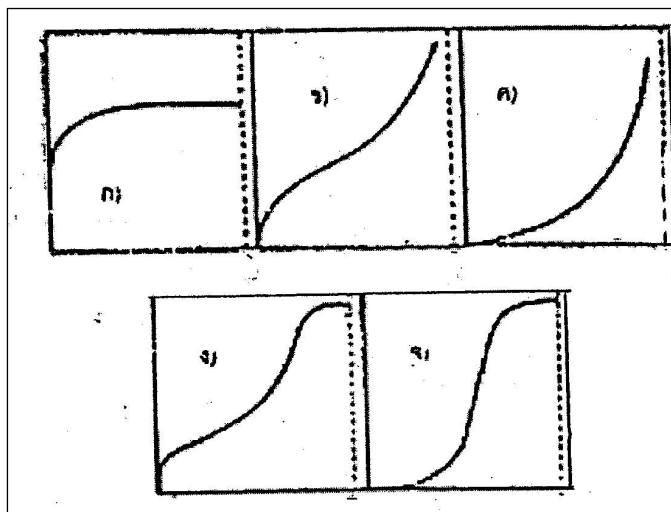
เมื่อ C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

4.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

รูปแผนภูมิเส้นที่พล็อตระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron, S.H. and Prutton, C.F. (1961)

จากภาพที่ 9 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบขั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

4.7.1 สมการการดูดซับของฟรุนดลิช (freundlich adsorption isotherm) คือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \text{-----} (15)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรึนดลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่ว ๆ ไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (15) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

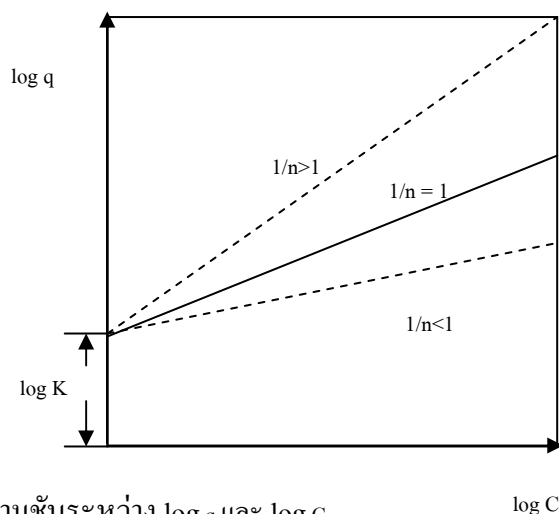
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ = ความชันของกราฟ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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



ภาพที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

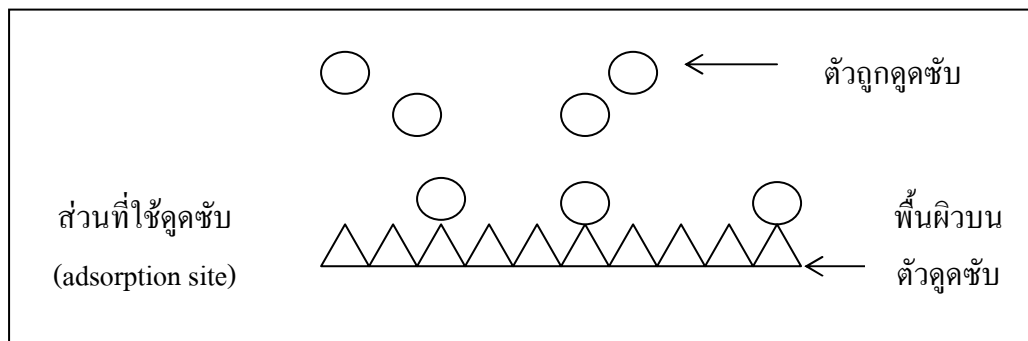
ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

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

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (14) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้

4.7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) ได้มีข้อกำหนดพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 11) โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่น

บนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)



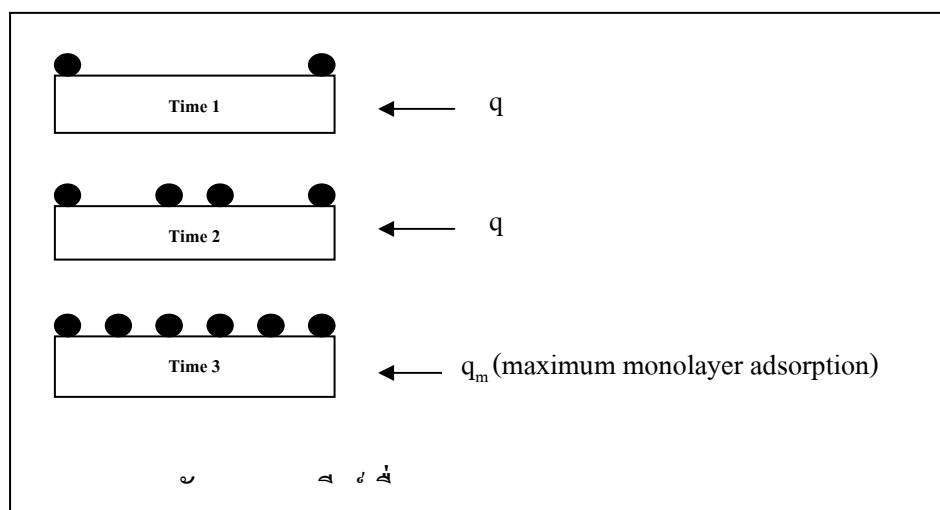
ภาพที่ 11 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมการการดูดซับ (4.6) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์

รูปแบบสมการของแลงเมียร์จะใช้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \text{----- (17)}$$



ภาพที่ 12 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ 17 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad \text{----- (18)}$$

q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

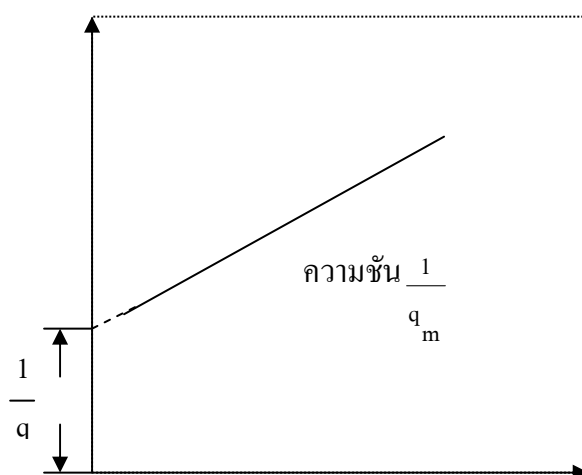
q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$

และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 13 กราฟแสดงความชันระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

4.8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

4.8.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

4.8.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

4.8.3 อัตราเร่งการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับผิวขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่ผ่านรูพรุน (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกววนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้รวดเร็ว ดังนั้น การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

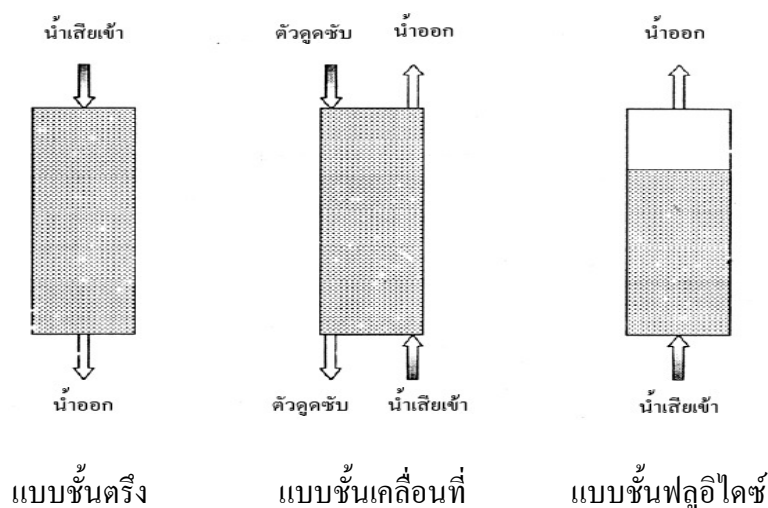
4.8.4 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

4.8.5 pH การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

4.8.6 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของถังดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย (ฉัตรสินี, 2545)

4.9 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง (Column)

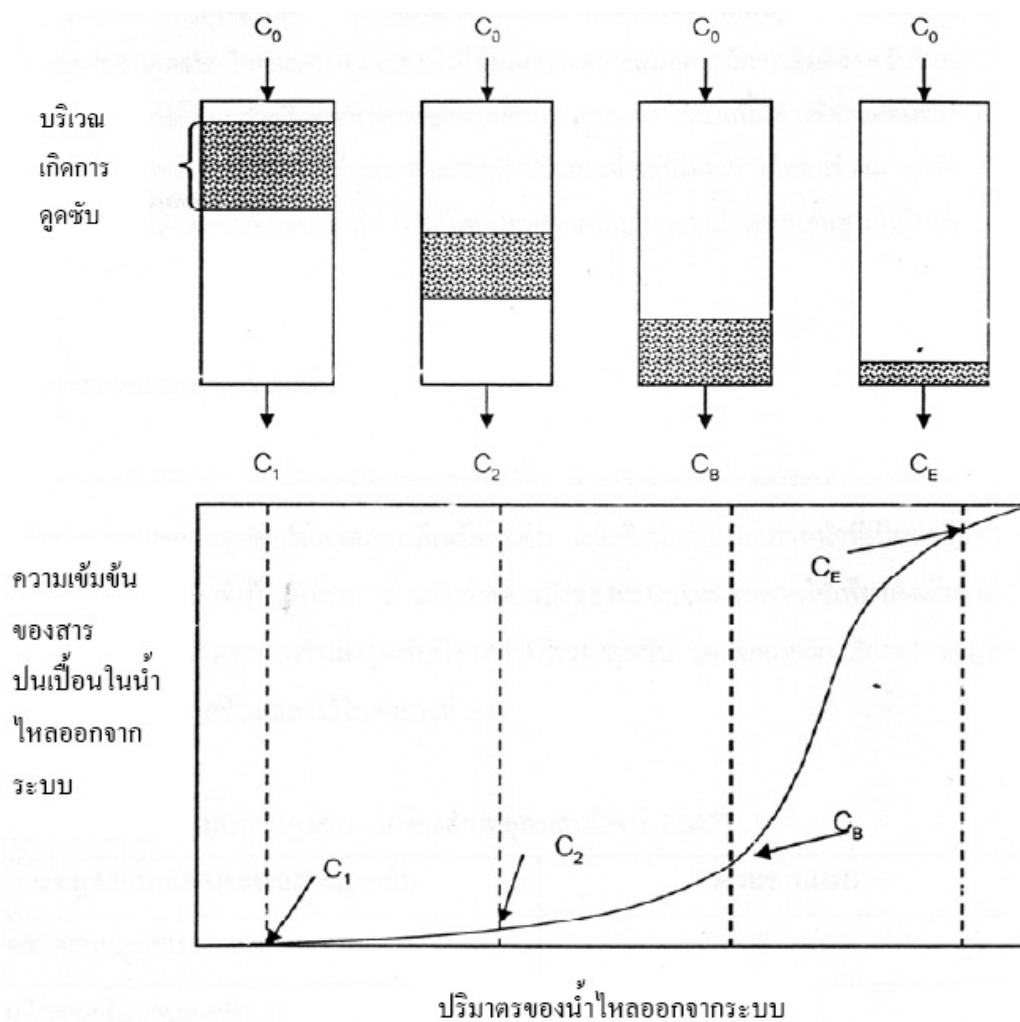
ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบครั้งคราว (batch) ระบบแบบไหลต่อเนื่องนิยมใช้กับปริมาณน้ำเสียมาก ๆ ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ แบบชั้นตรึง (fixed bed) แบบชั้นเคลื่อนที่ (moving bed) และแบบฟลูอิดไคซ์ (fluidized bed) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

ที่มา: กิตตินันท์ (2546)

4.9.1 แบบชั้นตรึง (fixed bed) ระบบดูดซับแบบนี้โดยผ่านน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะไอออนเริ่มต้นเท่ากับ C_0 ให้ไหลลงผ่านชั้นตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ กระบวนการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับค่อย ๆ เคลื่อนลงจนถึงส่วนล่างของชั้น จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนกันของชั้น ดังแสดงผลการดูดซับไว้ในภาพที่ 15 ณ จุด C_B คือ จุดที่การดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ เรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (breakpoint) และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกสูงขึ้นคือ การดูดซับค่อย ๆ หมดสภาพจนไม่สามารถดูดซับโลหะไอออนในน้ำเสียได้อีก เรียกเส้นโค้งนี้ว่า breakthrough curve จนถึง ณ จุด C_E ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่า จุดหมดสภาพ (exhaustion point) ค่า C_1 คือ ความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียออกจากระบบในระยะแรก C_2 คือ ความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียที่ออกจากระบบในระยะที่สอง



ภาพที่ 15 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องในชั้นตรึง

ที่มา: กิตตินันท์ (2546)

4.9.2 แบบชั้นเคลื่อนที่ (moving bed) ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นพร้อมกับมีการเปลี่ยนสิ่งดูดซับจากบริเวณส่วนก้นของถัง ซึ่งจะหมดสภาพก่อน ระบบนี้มักมีประสิทธิภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ไม่นิยมใช้กับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องควบคุมดูแลการเคลื่อนย้ายสิ่งดูดซับออกอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของถัง ระบบนี้มีใช้กันในงานแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม

4.9.3 แบบชั้นฟลูอิดाइซ์ (fluidized bed) ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วสูงมากพอให้สิ่งดูดซับเกิดการแขวนลอยในระบบได้ แต่ต้องไม่ทำให้สิ่งดูดซับลอยขึ้นมากจนหลุดออกจากชั้นดูดซับ ในการควบคุมระบบให้ได้ผลอย่างสม่ำเสมอควรมีการเติมสิ่งดูดซับใหม่เข้าจากด้านบนของถัง และถ่ายสิ่งดูดซับเก่าออกจากด้านล่างของถัง ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงกว่าระบบแบบชั้นตรึง แต่มีข้อดีที่ระบบสามารถรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้ค่อนข้างมากกว่า และสามารถเลือกใช้สิ่งดูดซับที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ โดยปราศจากปัญหาสูญเสียความดันสูงเกินไปในระบบ (กิตตินันท์, 2546)

4.10 ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาการใช้งาน (service time) ของสารดูดซับ

4.10.1 ความลึกของชั้นสารดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของสารดูดซับมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกของชั้นสารดูดซับ และลดลงเมื่อความลึกของชั้นสารดูดซับลดลง

4.10.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ (specific surface area) สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเวลาการใช้งานจะมีแนวโน้มมากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

4.10.3 อัตราการบำบัด (Hydraulic loading rate, HLR) คือ อัตราที่ของไหลหนึ่งหน่วยปริมาตรเคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์สารดูดซับ มีค่าอยู่ในช่วง 2-10 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต จะส่งผลกระทบต่อเวลาการใช้งานของสารดูดซับ คือ ที่อัตราการบำบัดสูงจะมีเวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ

4.10.4 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับจะส่งผลกระทบต่อเวลาการใช้งาน โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับสูง ทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ (พรรณราย, 2546)

4.11 ทฤษฎีการกรอง

กระบวนการกรองน้ำเป็นขั้นตอนหนึ่งในการทำมาสะอาดน้ำ โดยการผ่านน้ำสู่ตัวกรองที่มีรูพรุนเพื่อกำจัดสารแขวนลอยต่าง ๆ ออกไป ด้วยกลไกทางกายภาพ และเคมี ทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการนี้มีความสะอาดตามต้องการ โดยการกรองจะเกิดขึ้นเมื่อมีกลไกการกรองน้ำดังต่อไปนี้

4.11.1 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (transport mechanism) ในการกรองผ่านชั้นสารกรอง สารแขวนลอยเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี วิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (brownian diffusion) วิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอน (sedimentation) ในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ ขนาด และการกระจายขนาด (size distribution) ของสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก

4.11.2 กลไกจับสารแขวนลอย (attachment mechanism) สารแขวนลอยขนาดใหญ่ อาจตกตะกอนและเกาะติดอยู่บนสารกรอง หรืออาจตกค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้สามารถกรองออกจากรน้ำได้ อย่างไรก็ตามปรากฏว่าเครื่องกรองสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กออกจากรน้ำได้ด้วย ซึ่งกลไกทางกายภาพเพียงลำพังไม่น่าจะทำได้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการกรองน้ำต้องอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย กลไกดังกล่าวคือ การดูดติดผิว (adsorption) และทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์สามารถเกาะจับอยู่บนสารกรอง หรือบนสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว อย่างไรก็ตาม สารกรองและคอลลอยด์มักมีประจุลบทั้งคู่ จึงต้องมีการทำลายประจุไฟฟ้าของสารตัวใดตัวหนึ่งก่อนหรือของทั้งคู่ เพื่อมิให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุเดียวกัน ในกรณีของการกรองน้ำ คอลลอยด์ในน้ำเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองซึ่งอยู่กับที่ ทำให้สามารถทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ก่อนผ่านเข้าชั้นกรองได้ หรือถ้าเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นประจุบวกก่อนผ่านเข้าชั้นกรอง ก็จะได้ผลในการกรองมากยิ่งขึ้น เพราะการที่สารกรองและคอลลอยด์มีประจุต่างกัน เป็นการส่งเสริมการดูดติดผิวให้เกิดขึ้นอย่างเหนียวแน่น ในบางครั้งคอลลอยด์ต่าง ๆ อาจรวมกันเป็นฟล็อก ทำให้มีขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอนเป็นสารกรองหรือติดค้างอยู่ในระหว่างช่องว่าง (ฉัตรสินี, 2545)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yukphan (1989) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดเหล็กในน้ำซึ่งเดิมไฮดรอกไซด์ (FeSO₄·7H₂O) ให้มีปริมาณเหล็ก 7.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สารละลายต่างทับทิม และนำไปกรองโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเกลือถ่านหินเป็นตัวกรอง ชั้นกรองมีความสูง 80 เซนติเมตร พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กได้ดีกว่าเกลือถ่านหินได้ทุกอัตรากรอง ตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 แกลลอน/นาฬิกา/ตารางฟุต เล็กน้อย

Theis และ Singer (1990) ค้นพบว่า แหล่งน้ำใต้ดินในหลายพื้นที่ที่มีเหล็กและสารอินทรีย์ละลายอยู่ด้วยกันนั้น จะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการกำจัดทั้งเหล็กและสารอินทรีย์ โดยการเติมออกซิเจนธรรมชาติจะไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็กได้ เพราะมีปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสารอินทรีย์เกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ 3 ปฏิกิริยา ได้แก่

- เกิดพันธะเปปไทด์ (peptide) ระหว่างสารอินทรีย์ และไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ที่จับตัวอยู่กับน้ำโดยแรงทางไฟฟ้า

- เกิดสารคีเลต (chelating) ระหว่างเหล็กและสารอินทรีย์

- เกิดการรีดิวซ์ไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ ไปเป็นไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์โดยสารอินทรีย์ ทำให้เหล็กมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

Viswanathan และ Boettcher (1991) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดเหล็กจากแหล่งน้ำใต้ดินโดยใช้กระบวนการทางชีววิทยา เพื่อแก้ปัญหาการกำจัดเหล็กในแหล่งน้ำใต้ดินที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ด้วย และได้ค้นพบว่า กระบวนการทางชีววิทยาสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี โดยจุลินทรีย์จะทำลายพันธะระหว่างเหล็กกับสารอินทรีย์ ให้เหล็กอยู่ในรูปเหล็กอิสระก่อน จากนั้น จุลินทรีย์ที่ใช้เหล็กเป็นแหล่งพลังงานก็จะทำการออกซิไดซ์เหล็ก จุลินทรีย์ที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงานก็จะออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่อไป

Maree และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการรวมกระบวนการออกซิไดซ์ไอร้ออน (II) ไออออน และการสะเทินน้ำจากเหมืองที่มีสภาพเป็นกรดด้วยหินปูน พบว่าการออกซิไดซ์ไอร้ออน (II) ไออออน ทางเคมีจะเกิดขึ้นเด่นชัดในช่วงพีเอชมากกว่า 6 และที่ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-6 การออกซิไดซ์ไอร้ออน (II) ไออออน ทั้งทางเคมีและทางชีววิทยาจะเกิดขึ้นได้ดีพอๆ กัน ซึ่งการสะเทินน้ำจากเหมืองที่มีสภาพเป็นกรดด้วยหินปูนนั้น จะสามารถกำจัดซัลเฟตในน้ำไปได้ในบางส่วนด้วย

สมชัย (2541) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายหางกระรอก ในสถานะที่ให้แสง กับในสถานะไม่ได้รับแสง โดยใช้สารตะกั่วที่ใส่ลงไป 100 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นความเข้มข้นเบื้องต้น แล้วเลี้ยงในสถานะให้แสงกับให้แสงน้อย 11 วัน พบว่าในสถานะที่ให้แสง มีการดูดซับตะกั่วร้อยละ 5.21 ที่ให้ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และร้อยละ 3.69 ที่ให้ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนในสถานะที่ให้แสงน้อย มีการดูดซับตะกั่วร้อยละ 1.2 จากที่ให้ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และร้อยละ 0.83 จากที่ให้ 50 มิลลิกรัม/ลิตร วัดโดยใช้เครื่อง atomic absorption spectrophotometer แสดงว่า การดูดซับมีมากที่สถานะที่พืชได้รับแสงสว่างมากในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชนั้น

เสาวภา (2544) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอร้ออน (II) ไออออน บนถ่านกระดูกและอลูมินากัมมันต์ด้วยวิธีทางสเปกโทรสโกปี โดยเริ่มจากการหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอร้ออน (II) ไออออน ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่า 30 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า การดูดซับไอร้ออน (II) ไออออน ในช่วงความเข้มข้น 1-6 มิลลิกรัม/ลิตร บนถ่านกระดูกเป็นแบบขั้นเดียว ขณะที่การดูดซับไอร้ออน (II) ไออออน บนอลูมินากัมมันต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเชิงเส้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเกิดการออกซิเดชันจากไอร้ออน (II) ไออออน เป็นไอร้ออน(III)ไออออนที่ความเข้มข้นของไอร้ออน (II) ไออออน สูงกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร

วรพจน์ (2544) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดลูมิเนียมและเหล็กในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์โดยใช้เปอร์แมงกาเนตไออออน โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก ทำการศึกษาการดูดซับลูมิเนียมของถ่านกัมมันต์ปกติเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเปอร์แมงกาเนตไออออนที่ผิว 1 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก ในสถานะปกติ (พีเอชเท่ากับ 3.4) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของฟรอนดิชระหว่างลูมิเนียมกับถ่านกัมมันต์ปกติและถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเปอร์แมงกาเนตไออออนที่ผิว 1 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.01 และ 0.03 ตามลำดับ ในขณะที่ที่ภายใต้สภาวะที่เป็นเบส (พีเอชเท่ากับ 13) การดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีค่าน้อยมาก ส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยใช้เหล็กเป็นสารที่ถูกดูดซับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ

ของฟรุติซของถ่านกัมมันต์ปกติและถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเปอร์แมงกาเนตไอออนที่ผิว 1 ต่อ 6, 1 ต่อ 3, 1 ต่อ 2 และ 2 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.06, 0.26, 0.30, 0.34 และ 0.38 ตามลำดับ การทดลองส่วนที่สาม เป็นการทดสอบเปรียบเทียบการดูดซับฟิวในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ปกติและถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเปอร์แมงกาเนตไอออนที่ผิว 1 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า ถ่านกัมมันต์ปกติจะหมดสภาพภายในเวลา 120 ชั่วโมง ปริมาณอูมิเนียมที่ถูกดูดซับ 180 มิลลิกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเปอร์แมงกาเนตไอออนที่ผิว 1 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก จะหมดสภาพภายในเวลา 320 ชั่วโมง ปริมาณอูมิเนียมที่ถูกดูดซับ 600 มิลลิกรัม และในการดูดซับเหล็ก ถ่านกัมมันต์ปกติจะใช้งานได้นาน 220 ชั่วโมง ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับ 320 มิลลิกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเปอร์แมงกาเนตไอออนที่ผิว 1 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก สามารถใช้งานได้มากกว่า 500 ชั่วโมง ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับมากกว่า 1,000 มิลลิกรัม ก่อนหมดสภาพ

พัชรภรณ์ (2545) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (ในน้ำ) โดยใช้สารคีเลตติ้งโพลิเมอร์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 4 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิด ได้แก่ พรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดพร้อมกัน ในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง (เจือจาง 10 เท่า) ผลการศึกษาพบว่า สารคีเลตติ้งโพลิเมอร์สามารถกำจัดเงินและพรอทได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมและเหล็กได้ ซึ่งค่าพีเอชไม่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเงินและพรอท นอกจากนี้การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารคีเลตติ้งโพลิเมอร์มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ชีวิน และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากการใช้อาหารที่มีปริมาณโปรตีนสูง อาหารที่เหลือจากการเลี้ยงรวมทั้งของเสียจากการขับถ่าย ทำให้เกิดการเจริญของแพลงก์ตอนพืชอย่างรวดเร็วและการใช้ออกซิเจน ในการย่อยสลายของเสีย ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาขาดออกซิเจนและทำให้สภาพแวดล้อมในแหล่งเลี้ยงกุ้งเสื่อมลง จึงมีการนำระบบบำบัดทางชีวภาพมาใช้ในการจัดการเลี้ยงกุ้งที่มีประสิทธิภาพ น้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งประกอบด้วยสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรียหรือแพลงก์ตอน จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถใช้เป็นอาหารของสัตว์น้ำบางชนิด เช่น หอย ปลา หรือแพลงก์ตอนสัตว์ การปลูกพืชน้ำก็จะสามารถในการช่วยดูดซับธาตุอาหารจากการขับถ่ายของเสียของสัตว์น้ำเหล่านี้ จากการทดลองพบว่า อัตราการดูดซับแอมโมเนียสูงสุดของพืชน้ำ ได้แก่ สาหร่ายพวงพะโค และแห่น มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.04 และ 0.05 มิลลิกรัม/กรัม ที่ความหนาแน่น 2.5 กรัม/ลิตร และ 0.8 กรัม/ลิตร ตามลำดับ

อุษา และยุทธการ (2546) ได้ทำการศึกษาโดยการนำหอยกาน้ำจืดและสาหร่ายหางกระรอกมาช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงปลา โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อหอย 1 ตัวในการลดปริมาณความขุ่น ขั้นตอนที่ 2 หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อสาหร่าย 4 กรัม ในการลดปริมาณความขุ่น และผลการทดลองที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 1 และ 2 มาทดลองในขั้นตอนที่ 3 เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อหอย 1 ตัวและสาหร่าย 4 กรัมในการลดปริมาณความขุ่น ขั้นตอนที่ 4 การเพิ่มสัดส่วนของปริมาณน้ำ จำนวนหอย และสาหร่าย ตามสัดส่วนของผลการทดลองที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่ 3 มาศึกษาคุณสมบัติของน้ำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ จากผลการทดลองขั้นตอนที่ 3 พบว่า ปริมาณน้ำ 5 ลิตรต่อหอย 1 ตัว จะมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดได้ประมาณ 10 เท่า ภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลจากการเพิ่มสัดส่วนของปริมาณน้ำ จำนวนหอย และสาหร่าย พบว่า ปริมาณน้ำ 200 ลิตรต่อหอย 20 ตัว และสาหร่าย 80 กรัม สามารถลดปริมาณความขุ่นได้ดีที่สุดประมาณ 9 เท่าภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนความเป็นกรด-เบส ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าบีโอดี ในไตรท์ ในเตรท และฟอสเฟต มีค่าใกล้เคียงกับ น้ำก่อนการทดลอง โดยปริมาณต่างๆ ยังอยู่ในช่วงที่สัตว์น้ำสามารถดำรงชีวิตได้ ยกเว้นปริมาณแอมโมเนียมีค่าสูงกว่าเริ่มต้นประมาณเกือบ 6 เท่า ทุกการทดลองของแต่ละกรรมวิธีไม่มีหอยตายและสาหร่ายยังอยู่สภาพเหมือนเดิมแต่บริเวณใบจะมีตะกอนเกาะอยู่

วรชาติ (2547) ได้ทำการศึกษาระบบบำบัดเหล็กในน้ำบาดาลบ่อตื้นโดยวิธีการเติมอากาศและการกรอง และศึกษาประสิทธิภาพของสารกรองซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการทำนา โดยแบ่งออกเป็น 2 บ่อ ซึ่งบ่อที่ 1 มีเหล็กน้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กของแกลบและฟางข้าว และใช้ทรายกรองและหินเกล็ดเป็นสารกรองอ้างอิง และบ่อที่ 2 มีเหล็กมากกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยได้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กของแกลบที่มีความหนา 20, 30, 40 และ 50 เซนติเมตร และผลของการเติมอากาศและการดูดซับโดยแกลบ ผลการวิจัยพบว่า ในน้ำบาดาลที่มีเหล็กน้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร แกลบสามารถกรองเหล็กในน้ำบาดาลได้ดีกว่าฟางข้าว แกลบมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 59.25 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับร้อยละ 15.39 ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับทรายกรอง (ค่าเฉลี่ยร้อยละ 70.25 และ SD ร้อยละ 7.50) และหินเกล็ด (ค่าเฉลี่ยร้อยละ 56.50 และ SD ร้อยละ 3.11) ในขณะที่ฟางข้าวสามารถกรองเหล็กได้เพียงร้อยละ 19.00 และ SD ร้อยละ 4.16 ส่วนในน้ำบาดาลที่มีเหล็กมากกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร เท่ากับ 0.05 ความหนาของแกลบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก (การเติมอากาศ, การดูดซับโดยแกลบ และการกรองทำให้ปริมาณเหล็กลดลงเฉลี่ยร้อยละ 10, 15 และ 45 ตามลำดับ

สุชีรา (2547) ได้ทำการศึกษาความทนทานและการสะสมแคดเมียมในพืชน้ำลิบสามชนิด พบว่า ค่า bioconcentration factor มีค่าสูงในพืชทุกชนิดที่เลี้ยงในสารอาหารที่ผสมแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่ำ (0.1 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) *Ceratophyllum demersum* และ *Hydrilla verticillata* สามารถสะสมแคดเมียมได้มากกว่าพืชชนิดอื่นๆ เมื่อเลี้ยงพืชสองชนิดนี้ด้วยกัน ค่า relative growth ของ *C. demersum* จะสูงกว่า *H. verticillata* ที่แคดเมียมความเข้มข้นต่ำ พืชทั้งสองชนิดนี้ตายที่แคดเมียมความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร และความสามารถในการสะสมแคดเมียมของ *H. verticillata* สูงกว่า *C. demersum* และจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมโดยมวลแห้งของ *H. verticillata* พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงมากที่สารละลายแคดเมียมความเข้มข้นต่ำ การดูดซับแคดเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและอิ่มตัวในเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 5-9 สมดุลของการดูดซับแคดเมียมเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์มวลแห้งของ *H. verticillata* ที่บรรจุในแท่งแก้วสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมจาก 10 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นน้อยกว่า 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อนำมาใช้ซ้ำ นอกจากนั้นสังกะสีมีผลกระทบต่อการดูดซับแคดเมียมของ *H. verticillata*

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

- 1.1 pH meter รุ่น 315
- 1.2 เครื่องเขย่า (shaker) Model VRN-480 GEMMY Orbit Shaker
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น AB 204-S
- 1.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 20 D
- 1.5 เครื่องบดละเอียด
- 1.6 ตู้อบ
- 1.7 ตะแกรงแยกขนาด
- 1.8 เซสซิกเตเตอร์
- 1.9 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman
- 1.10 เครื่องแก้วที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด

2. สารเคมี

- 2.1 ferrous ammonium sulfate, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

2.2 hydroxylammonium chloride, $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$

2.3 sodium acetate, CH_3COONa

2.4 1,10-phenanthroline monohydrate, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

2.5 น้ำกลั่น

วิธีการ

1. การเตรียมสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโดน

1.1 นำสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโดนที่เก็บมาได้ล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำมาตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 1-2 วัน แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำสาหร่ายมาบดให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน จะได้สาหร่ายเป็นผง ดังภาพที่ 16 และ 17 เก็บผงสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ผ่านจากการร่อนแยกใส่ถุงพลาสติกแล้วเก็บไว้ในเดสซิเคเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป



ภาพที่ 16 สาหร่ายหางกระรอกบดเป็นผงเพื่อใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 17 สาหร่ายพุงชะโดบดเป็นผงเพื่อใช้ในการทดลอง

1.2 ทำการวัดค่าพีเอชเริ่มต้นของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด โดยชั่งสาหร่ายทั้งสองชนิดปริมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าพีเอชของสารละลาย พบว่า ค่าพีเอชของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดมีค่าเท่ากับ 5.9 และ 6.5 ตามลำดับ

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายไอธรีออน (II) ไอออน

2.1 การเตรียมสารละลาย

2.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไอธรีออน (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร

ชั่งแอมโมเนียมไอธรีออน (II) ซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต จำนวน 0.0702 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นใน ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.1.2 การเตรียม hydroxylammonium chloride solution

ชั่ง hydroxylammonium chloride มา 10 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.1.3 การเตรียม sodium acetate solution

ชั่ง sodium acetate มา 10 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.1.4 การเตรียม 1,10-phenanthroline solution

ชั่ง 1,10-phenanthroline monohydrate มา 0.1 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของไอร์ออน (II) ไอออน

2.2.1 นำสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน 100 มิลลิกรัม/ลิตร มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ปริมาตร 1, 3, 5, 7 และ 9 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2.2.2 เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ที่เตรียมไว้ ใส่ลงในสารละลายไอร์ออน (II) ไอออน แต่ละความเข้มข้น ดังนี้

1) เติม hydroxylammonium chloride solution ปริมาตร 1 มิลลิลิตร

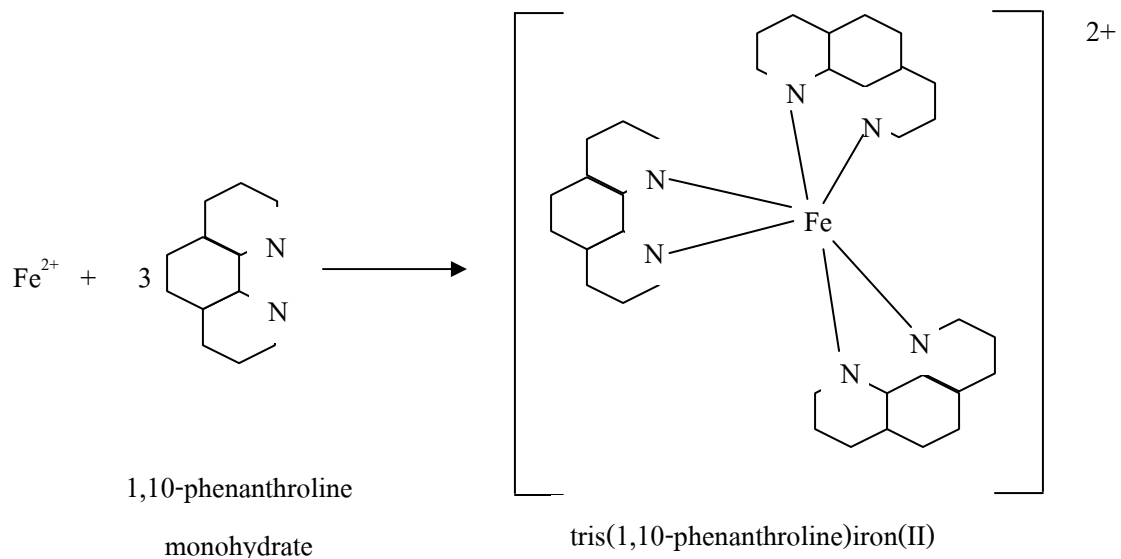
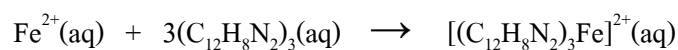
2) เติม 1,10-phenanthroline solution ปริมาตร 6 มิลลิลิตร

3) เติม sodium acetate solution ปริมาตร 4 มิลลิลิตร

2.2.3 ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่า จะได้สารละลายสีแดงส้ม เนื่องจากเหล็ก (Fe^{2+}) เกิดปฏิกิริยากับ 1,10-phenanthroline monohydrate ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ ที่มีสีแดงส้ม ซึ่งมีความเสถียรสูง โดยสารประกอบนี้จะยังคงสภาพอยู่ได้เป็นระยะเวลานานและเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's law) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังภาพที่ 18



hydroxylammonium
chloride



ภาพที่ 18 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของไอร์ออน (II) ไอออน กับ 1,10-phenanthroline monohydrate
ที่มา : มั่นสิน (2543)



ภาพที่ 19 สีของสารประกอบ tris(1,10-phenanthroline)iron(II) เพิ่มตามความเข้มข้นของ
ไอร์ออน (II) ไอออน

2.2.4 หลังจากนั้นนำสารละลายมาเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น 20 D ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และใช้น้ำกลั่นเป็นเบสและจดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้นำไปสร้างกราฟมาตรฐานที่พล็อตขึ้นระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกน y) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออน (แกน x) จะได้กราฟมาตรฐานที่มีค่าสภาพดูดกลืนโมลาร์(ϵ) เท่ากับ $8.2784 \times 10^3 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ดังภาพผนวกที่ 1

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน ไอรีออน (II) ไอออน 100 มิลลิกรัม/ลิตร

ชั่งแอมโมเนียมไอรีออน (II) ซัลเฟตเสกเซไฮเดรท จำนวน 0.7022 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไปพอประมาณ เขย่าให้แอมโมเนียมไอรีออน (II) ซัลเฟตเสกเซไฮเดรทละลาย จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับ เขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

4. การดำเนินการทดลอง

4.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตัวอย่างที่มีผลต่อการดูดซับของสารร้ายทางกระรอกและสารร้ายพุงชะโด โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ใช้ตัวอย่างของสารร้ายทางกระรอกและสารร้ายพุงชะโดชนิดละ 3 ชั่วโมง

4.1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร แบ่งใส่บีกเกอร์ 8 บีกเกอร์ บีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ให้ค่า pH เป็น 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 ตามลำดับ

4.1.2 ชั่งผงสารร้ายทางกระรอกและสารร้ายพุงชะโดปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 8 ขวด

4.1.3 นำสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออน ที่เตรียมได้ในข้อ 4.1.1 เทใส่ลงในผงสารร้ายที่ชั่งไว้ในข้อ 4.1.2 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา

30 นาที เมื่อครบเวลากลับ และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน

4.1.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 4.1.3 ไปเติมสารอินดิเคเตอร์ ดังนี้ hydroxylammonium chloride solution 1 มิลลิลิตร 1,10-phenanthroline solution 6 มิลลิลิตร และ sodium acetate 4 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าสารให้เข้ากัน นำไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

4.1.5 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือของไอร์ออน (II) ไอออน และร้อยละการดูดซับ

4.1.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าร้อยละการดูดซับกับค่าพีเอช

4.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารหายากและสารหายากพืชโคที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน และไอโซเทอร์มในการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน โดยทำการทดลองแบบแบดช์ ใช้ตัวอย่างของสารหายากและสารหายากพืชโคชนิดละ 3 ชั่วโมง

4.2.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร แบ่งใส่บีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ให้ได้พีเอชตามระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 4.1

4.2.2 ชั่งผงสารหายากและสารหายากพืชโคปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

4.2.3 นำสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ที่เตรียมได้ในข้อ 4.2.1 เทใส่ลงในผงสารหายากที่ชั่งไว้ในข้อ 4.2.2 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลากลับ และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน

4.2.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 4.2.3 ไปเติมสารอินดิเคเตอร์ ดังนี้ hydroxylammonium chloride solution 1 มิลลิลิตร 1,10-phenanthroline solution 6 มิลลิลิตร และ sodium acetate 4 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าสารให้เข้ากัน นำไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

4.2.5 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือของไอร์ออน (II) ไอออน และร้อยละการดูดซับ

4.2.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าร้อยละการดูดซับกับปริมาณสารห่วย

4.3 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของสารห่วยทางกระบอกและสารห่วยพวงชะโคที่ใช้ดูดซับสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน โดยการทดลองแบบแบตช์ ใช้ตัวอย่างของสารห่วยทางกระบอกและสารห่วยพวงชะโคชนิดละ 3 ซ้ำ

4.3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร แบ่งใส่บีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ให้ได้พีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 4.1

4.3.2 ชั่งผงสารห่วยทางกระบอกและสารห่วยพวงชะโคตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.2

4.3.3 นำสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ที่เตรียมได้ในข้อ 4.3.1 เทใส่ลงในผงสารห่วยที่ชั่งไว้ในข้อ 4.3.2 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที เมื่อครบเวลายกลง และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน

4.3.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 4.3.3 ไปเติมสารอินดิเคเตอร์ ดังนี้ hydroxylammonium chloride solution 1 มิลลิลิตร 1,10-phenanthroline solution 6 มิลลิลิตร และ sodium acetate 4 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าสารให้เข้ากัน นำไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

4.3.5 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือของไอร์ออน (II) ไอออน และร้อยละการดูดซับ

4.3.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าร้อยละการดูดซับกับเวลาเขย่า

4.4 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ของสารห่ายทางกระรอกและสารห่ายพุงชะโด โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ ใช้ตัวอย่างของสารห่ายทางกระรอกและสารห่ายพุงชะโดชนิดละ 3 ซ้ำ

4.4.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร แบ่งใส่ปิ๊งเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ให้ได้พีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 4.1

4.4.2 ชั่งผงสารห่ายทางกระรอกและสารห่ายพุงชะโดตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.2

4.4.3 นำสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน ที่เตรียมได้ในข้อ 4.4.1 เทใส่ลงในผงสารห่ายที่ชั่งไว้ในข้อ 4.4.2 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 เมื่อครบเวลายุกลง และตั้งทิ้งไว้ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที จากนั้นนำสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน

4.4.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 4.4.3 ไปเติมสารอินดิเคเตอร์ ดังนี้ hydroxylammonium chloride solution 1 มิลลิลิตร 1,10-phenanthroline solution 6 มิลลิลิตร และ sodium acetate 4 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าสารให้เข้ากัน นำไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

4.4.5 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือของไอร์ออน (II) ไอออน และร้อยละการดูดซับ

4.4.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าร้อยละการดูดซับกับเวลาสัมผัส

4.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนต่อการดูดซับของสารยี่ห้อทางกระรอกและสารยี่ห้อพวงชะโด โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ใช้ตัวอย่างของสารยี่ห้อทางกระรอกและสารยี่ห้อพวงชะโดชนิดละ 3 ซ้ำ

4.5.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออน ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ปีกเกอร์ละ 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ให้ได้พีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 4.1

4.5.2 ชั่งผงสารยี่ห้อทางกระรอกและสารยี่ห้อพวงชะโดตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.2

4.5.3 นำสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออน ที่เตรียมได้ในข้อ 4.5.1 เทใส่ลงในผงสารยี่ห้อที่ชั่งไว้ในข้อ 4.5.2 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 เมื่อครบเวลากลอง และตั้งทิ้งไว้ตามเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.4 จากนั้นนำสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน

4.5.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 4.5.3 ไปเติมสารอินดิเคเตอร์ ดังนี้ hydroxylammonium chloride solution 1 มิลลิลิตร 1,10-phenanthroline solution 6 มิลลิลิตร และ sodium acetate 4 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าสารให้เข้ากัน นำไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

4.5.5 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือของไอรีออน (II) ไอออน และร้อยละการดูดซับ

4.5.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าร้อยละการดูดซับกับความเข้มข้นของไอรีออน (II) ไอออน

4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอร้อนในสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอร้อน โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ตัวอย่างของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโคชนิดละ 3 ช้ำ

ทำการทดลองโดยใช้สารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอร้อน ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการ ทดลองในข้อ 4.1 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุ สาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโคชนิดละ 20 กรัม ทำการทดลองโดยเก็บสารละลาย มาตรฐานไอร้อน (II) ไอร้อนจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิตร และนำไปหาปริมาณไอร้อน (II) ไอร้อนที่เหลือด้วยวิธี 1,10-ฟีแนนโทรลีน

4.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสาหร่ายที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ทำการทดลองโดยนำสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโคที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากคอลัมน์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ตากให้แห้ง แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำสาหร่ายที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพปริมาณที่ หาได้จากการทดลองที่ 4.2 มาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับไอร้อนในสารละลายมาตรฐาน ไอร้อน (II) ไอร้อน เปรียบเทียบกับสาหร่ายที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของ สาหร่ายที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบดซ์ และนำไปหาปริมาณไอร้อน (II) ไอร้อนที่เหลือด้วยวิธี 1,10-ฟีแนนโทรลีน

4.8 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอร้อน (II) ไอร้อนในน้ำเสียจากโรงงานผลิต รถยนต์ และผลิตอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ตัวอย่างของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงพะโคชนิด ละ 3 ช้ำ

การทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงาน 4 แห่ง ได้แก่ โรงงานผลิตอิเล็กทรอนิกส์, โรงงานผลิตรถยนต์ A, โรงงานผลิตรถยนต์ B, และโรงงานผลิตรถยนต์ C ที่มีไอร้อน (II) ไอร้อน เจือปน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอร้อน (II) ไอร้อนเริ่มต้นก่อน หลังจากนั้นนำน้ำเสียมา ทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบดซ์ ของสาหร่ายหางกระรอกและ สาหร่ายพวงพะโค แล้วหาประสิทธิภาพการดูดซับไอร้อน (II) ไอร้อน ด้วยวิธี 1,10-ฟีแนนโทรลีน

5. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาในการทดลอง

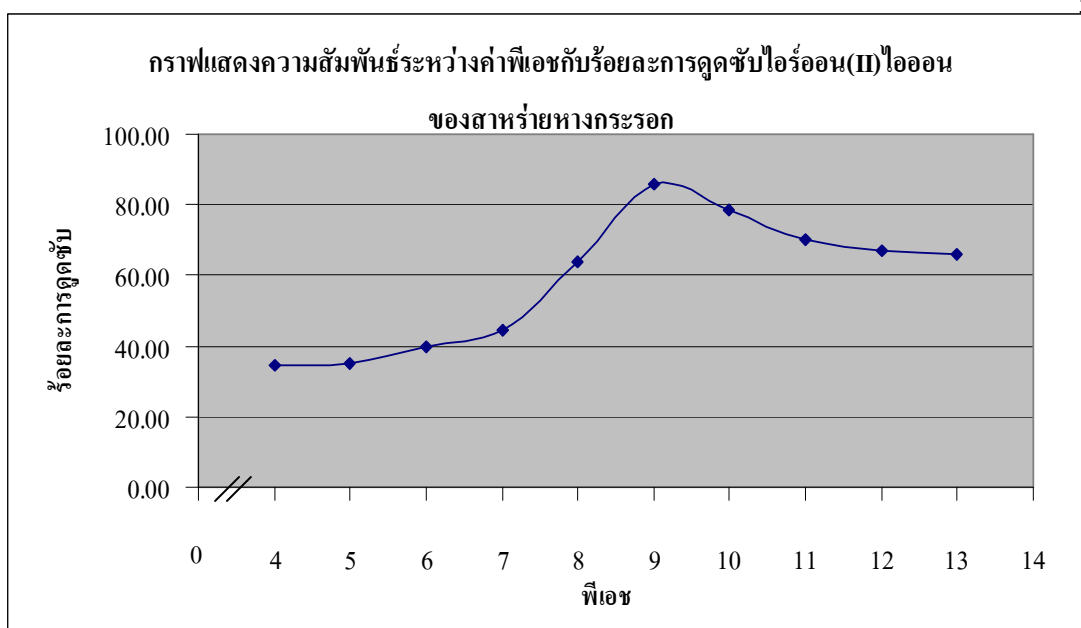
ระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัย 10 เดือน ตั้งแต่ เดือนกันยายน พ.ศ. 2550 ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2551

ผลและวิจารณ์

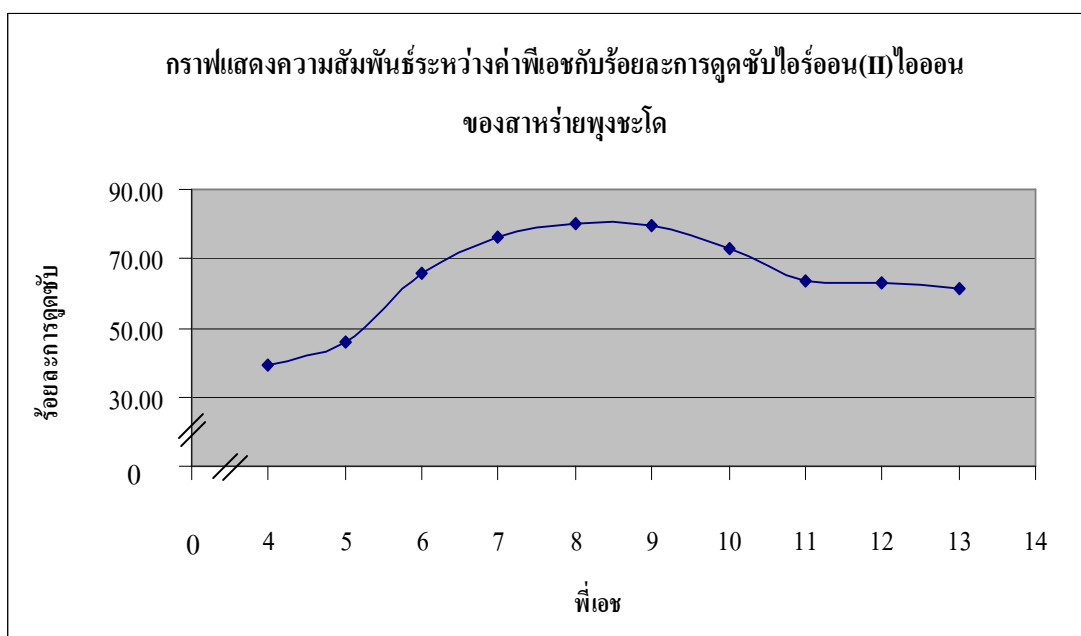
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเตรียมตัวดูดซับจากสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลกในการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน โดยการทดลองแบบเบตซ์ แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอช (pH) ปริมาณของสาหร่ายหางกระรอกและพวงกะโหลก ระยะเวลาปั่นกววน (equilibrium time หรือ shaking time) ระยะเวลาสัมผัส (contact time) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน เริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออน (II) ไอออน โดยใช้สาหร่ายหางกระรอกและพวงกะโหลก และทำการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออน (II) ไอออนในน้ำเสียโรงงานผลิตรถยนต์ โดยการทดลองแบบเบตซ์ และศึกษาการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนโดยการทดลองแบบคอลัมน์ และสุดท้ายศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสาหร่ายหางกระรอกและพวงกะโหลกภายหลังผ่านการใช้งานแบบคอลัมน์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน ต่อการดูดซับไอออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลก

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และทดลองแปรผันค่าพีเอช โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 10 ค่า ได้แก่ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, และ 13 ใช้ปริมาณสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพวงกะโหลก เท่ากับ 1 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 20, 21 และตารางผนวกที่ 1, 2



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด

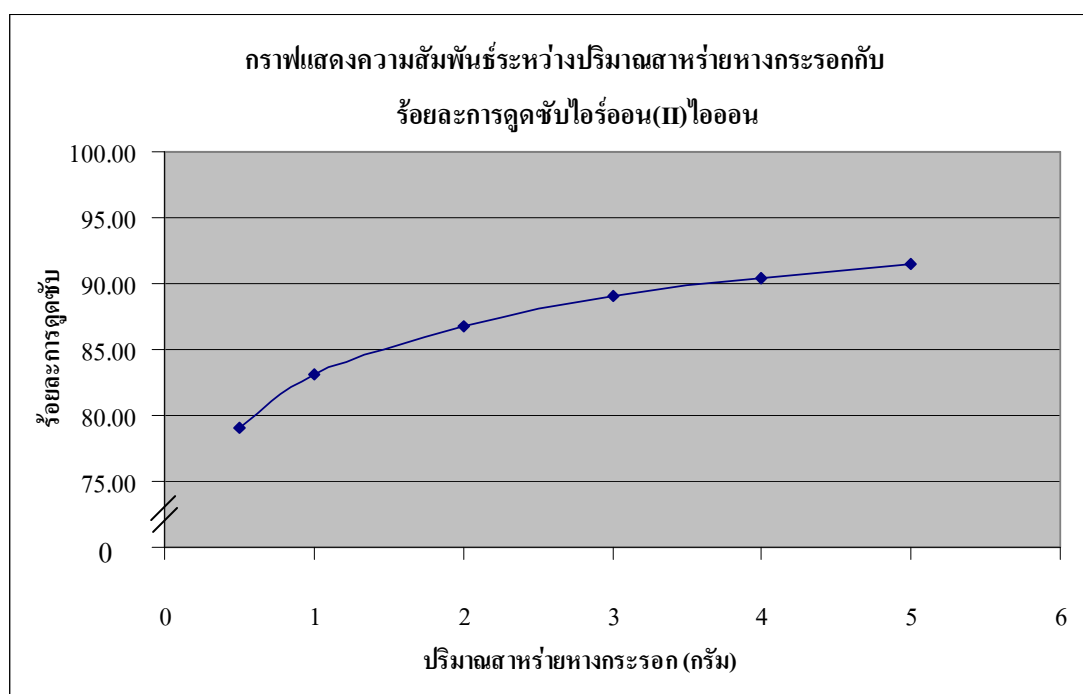
จากการทดลอง พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายมาตรฐานไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ ของสารละลายทางกระรอกจะเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งถึงจุดที่พีเอชมีค่าเท่ากับ 9 ประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 85.62 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์จะมีค่าค่อย ๆ ลดลง ซึ่งในช่วงพีเอช 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 และ 13 สารละลายทางกระรอกมีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ร้อยละ 34.40, 34.90, 39.95, 44.29, 64.07, 78.50, 70.24, 67.26 และ 65.83 ตามลำดับ ดังนั้น ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ของสารละลายทางกระรอก คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 9

ส่วนสารละลายฟอสเฟต พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายมาตรฐานไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกับสารละลายทางกระรอก จนกระทั่งถึงจุดที่พีเอชมีค่าเท่ากับ 8 ประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 80.13 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์จะมีค่าค่อย ๆ ลดลง ซึ่งในช่วงพีเอช 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 และ 13 สารละลายฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ร้อยละ 39.10, 45.78, 65.7, 76.3, 79.25, 73.01, 63.60, 62.78 และ 61.29 ตามลำดับ ดังนั้น ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ของสารละลายฟอสเฟต คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 8

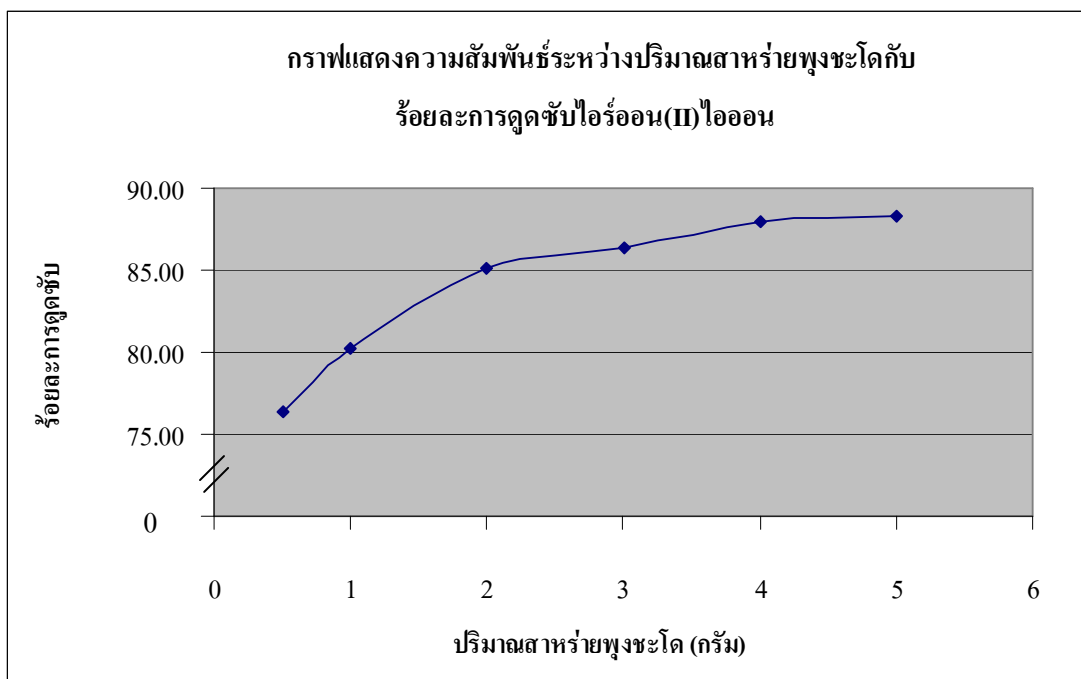
จากผลการทดลอง พบว่า สารละลายทางกระรอกและสารละลายฟอสเฟตสามารถดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ได้สูงสุดที่พีเอช 9 และ 8 ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายมาตรฐานไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ เมื่อมีพีเอชสูงขึ้น จะมีผลทำให้ไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ (OH^-) บนพื้นผิวสารละลายทั้ง 2 ชนิด เพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมาตรฐานไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ มีสถานะเป็นกรดจะมีผลทำให้ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวสารละลายทั้ง 2 ชนิด เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการผลักรันกับไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) และไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์จะถูกดูดซับได้น้อยลง (นิพนธ์ และคณะ, 2550) นอกจากนี้คุณสมบัติในการละลายน้ำของไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน กล่าวคือ ไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์สามารถละลายน้ำได้ดีที่สภาวะกรด จึงทำให้ไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์ถูกดูดซับได้ดีที่สภาวะเบส แต่ถูกดูดซับไม่ดีที่สภาวะกรด เนื่องจาก ก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์กับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลของไฮดรอกไซด์ (II) ไฮดรอกไซด์หลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของสารละลายทั้ง 2 ชนิด (Cruz *et al.*, 2004)

2. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศกต่อการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอรัออน (II) ไอออน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอรัออน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 8 และ 9 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ในการทดลองนี้จะทำการแปรผันปริมาณสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศกในช่วง 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ดังแสดงในภาพที่ 22, 23 และตารางผนวกที่ 3, 4



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาหร่ายหางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอรัออน (II) ไอออน



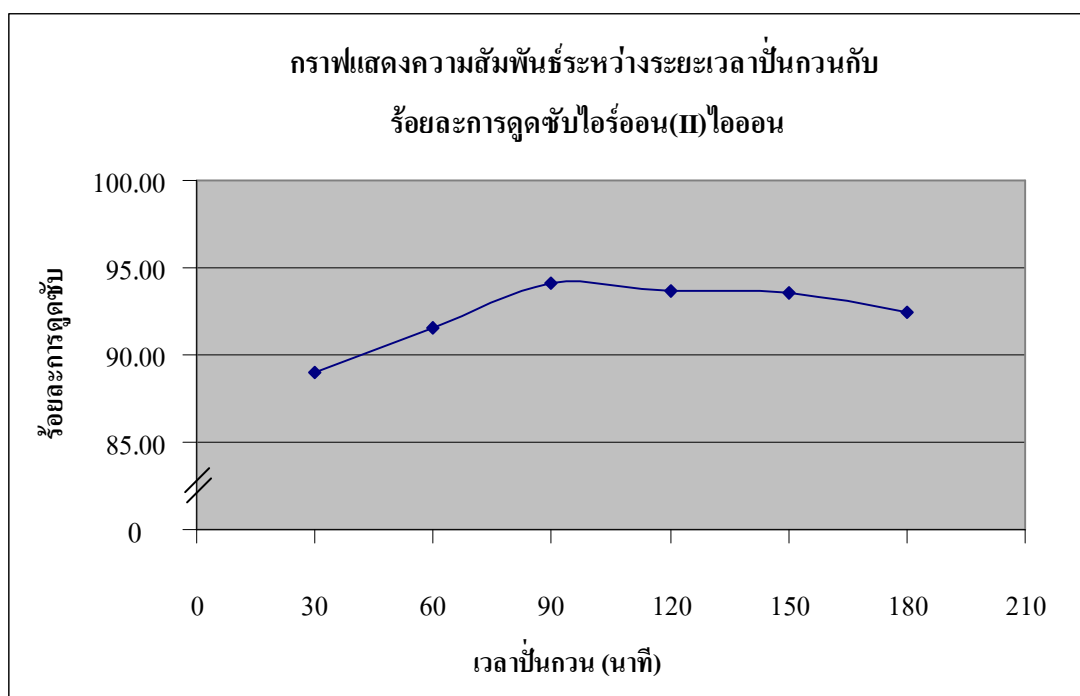
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน

จากการทดลอง พบว่า สาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดปริมาณ 5 กรัม สามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้สูงสุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.51 และ 88.26 ตามลำดับ สำหรับสาหร่ายหางกระรอกปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัม สามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 79.11, 83.11, 86.77, 89.01 และ 90.36 ตามลำดับ ส่วนสาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 76.40, 80.26, 85.14, 86.36 และ 87.99 ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกปริมาณสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดที่เหมาะสมจำนวน 3 และ 2 กรัม ตามลำดับ

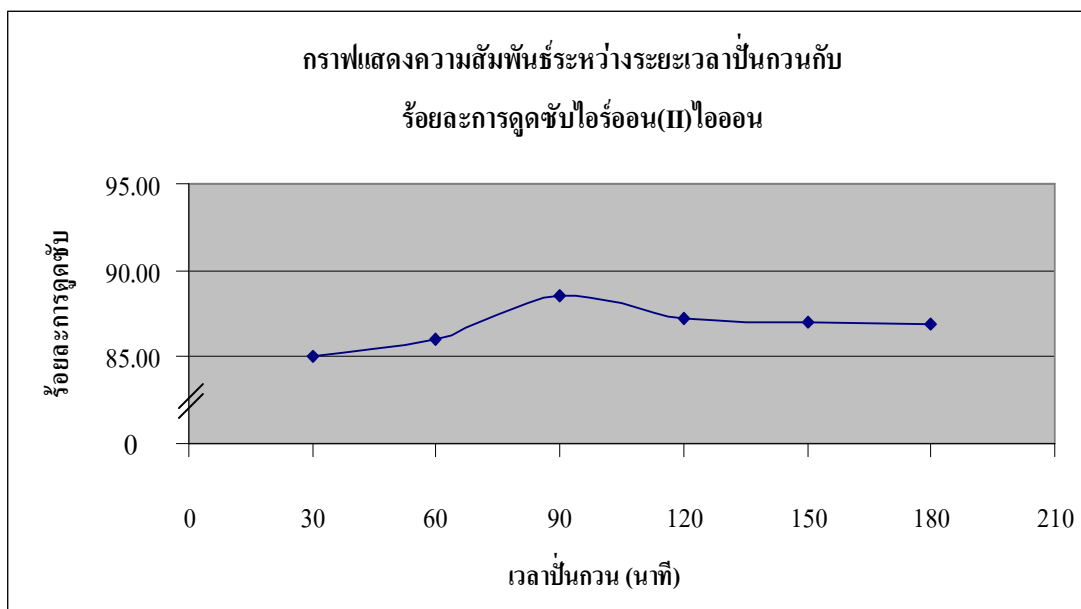
จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า เมื่อใช้ปริมาณสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก ไอร์ออน (II) ไอออนจะถูกดูดซับไว้บริเวณพื้นที่ผิวของสาหร่ายทั้งสองชนิด เมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ผิวในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนก็จะมีมากขึ้น และไอร์ออน (II) ไอออนก็จะถูกดูดซับในปริมาณมาก (Keskinan, 2004) เมื่อนำผลการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนมาวิเคราะห์ทางสถิติ จะเห็นได้ว่าปริมาณสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางผนวกที่ 21

3. ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ในการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน ของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศ

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 8 และ 9 ใช้สาหร่ายพวงกะโศและสาหร่ายหางกระรอกปริมาณ 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ นำไปแช่ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 24, 25 และตารางผนวกที่ 5, 6



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของ
สาหร่ายพวงชะโด

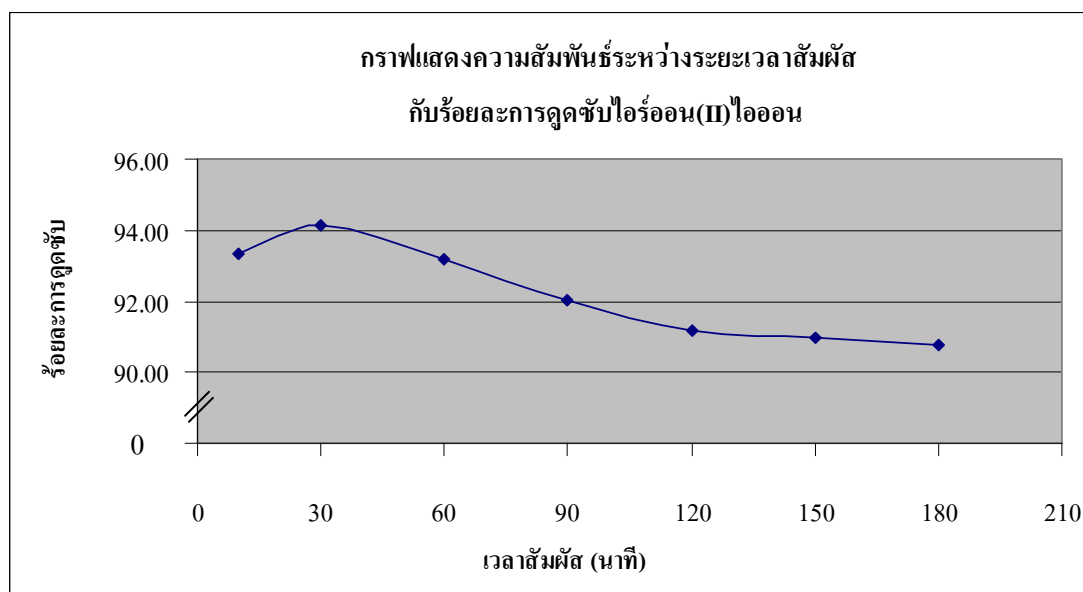
จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงระยะเวลาปั่นกวนที่ 90 นาที ซึ่งมีค่าการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 94.15 และ 88.56 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนจะมีค่าลดลง ดังนั้น ระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด คือ 90 นาที สำหรับระยะเวลาปั่นกวนที่ 30, 60, 120, 150 และ 180 นาที สาหร่ายหางกระรอกสามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 89.03, 91.58, 93.71, 93.54 และ 92.42 ตามลำดับ ส่วนสาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 85.07, 86.02, 87.20, 85.00 และ 84.74 ตามลำดับ

ผลของระยะเวลาปั่นกวน พบว่า สาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 90 นาทีแรกของการทดลอง หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนจะลดลง เนื่องจากการปั่นกวนในช่วง 90 นาทีแรก มีผลทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำลดลง ทำให้โมเลกุลไอร์ออน (II) ไอออนสามารถเคลื่อนที่เข้าหาสาหร่ายซึ่งเป็นตัวดูดซับได้เร็ว และในช่วงนี้จะมีอัตราการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนไวได้มากกว่าอัตราการคายซับ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน

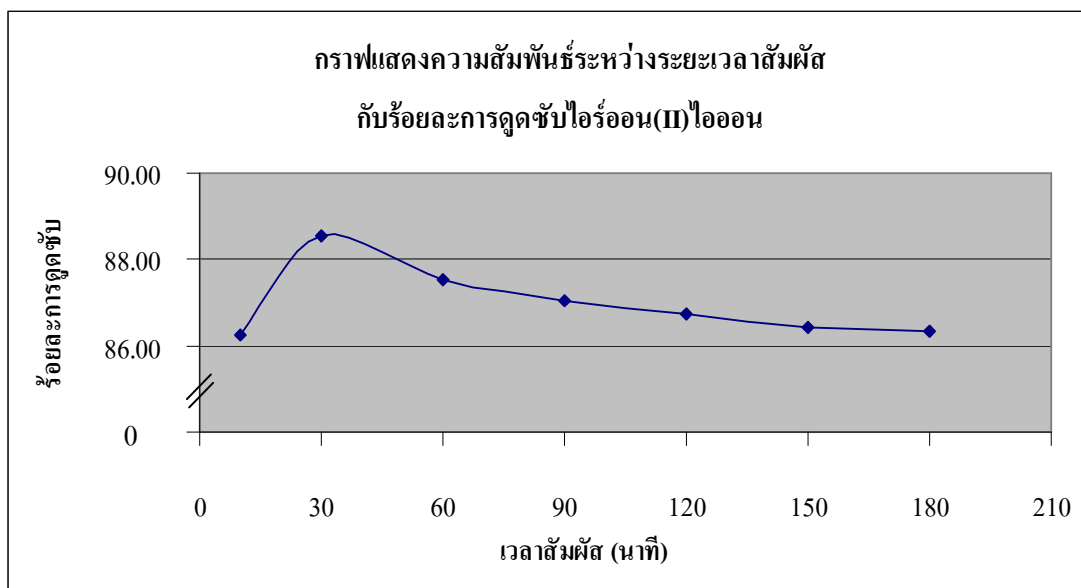
ของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด เพิ่มขึ้น จนถึงสภาวะสมดุลของการดูดซับ สาหร่ายทั้ง 2 ชนิดจะมีอัตราการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนเท่ากับอัตราการคายขับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) และหลังจากนั้นสาหร่ายก็จะมีอัตราการดูดซับลดลง ซึ่งก็คือ ช่วง 90 – 180 นาที จากการศึกษาของ Sushera (2007) พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายหางกระรอกจะเกิดขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาปั่นกววน 20 นาที เช่นเดียวกับการศึกษาของ Keskinan (2004) พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงของสาหร่ายพวงชะโดจะเกิดขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาปั่นกววน 20 นาที โดยให้ความเข้มข้นของสารละลาย 30 มิลลิกรัม/ลิตร

4. ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส ในการดูดซับไอร้อนในสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 8 และ 9 ใช้สาหร่ายพวงชะโดและสาหร่ายหางกระรอกปริมาณ 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ นำไปแช่ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 90 นาที และทดลองโดยแปรผันระยะเวลาสัมผัสโดยตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ดังแสดงในภาพที่ 26, 27 และตารางผนวกที่ 7, 8



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของ
สาหร่ายพวงชะโด

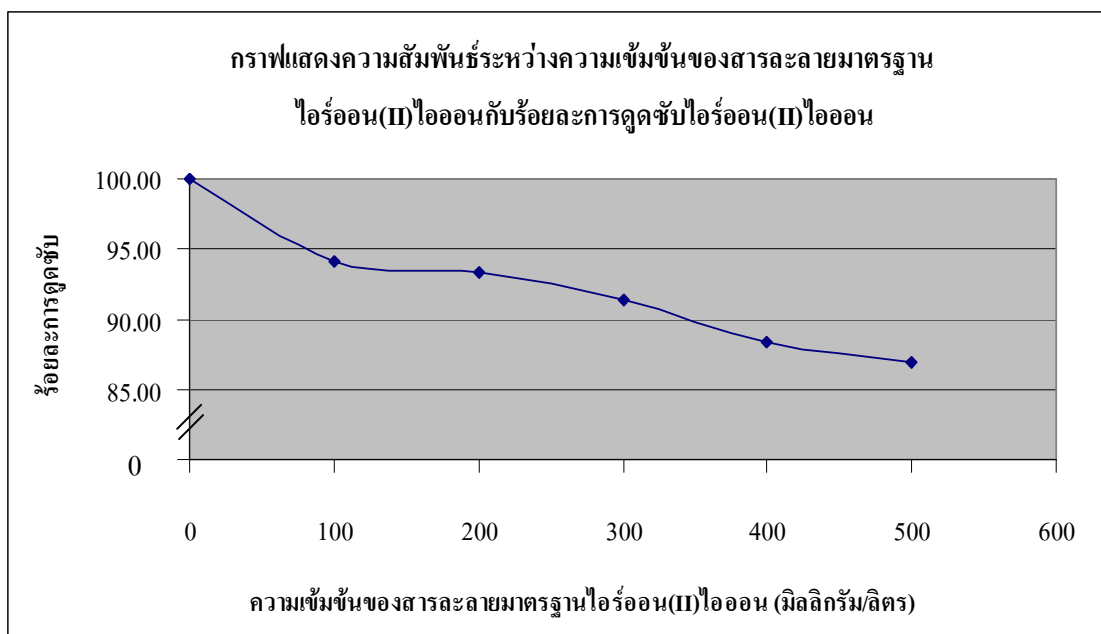
จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงระยะเวลาสัมผัสที่ 30 นาที ซึ่งมีค่าการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 94.15 และ 88.53 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนจะมีค่าลดลง ดังนั้น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก คือ 30 นาที สำหรับระยะเวลาสัมผัสที่ 10, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที สาหร่ายหางกระรอก สามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 93.34, 93.20, 92.05, 91.17, 90.97 และ 90.77 ตามลำดับ ส่วนสาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 86.26, 87.54, 87.04, 86.73, 86.43 และ 86.36 ตามลำดับ

ผลของระยะเวลาสัมผัส พบว่า สาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง เนื่องจากในช่วงนี้ไอร์ออน (II) ไอออนจะมีเวลาในการยึดเกาะติดกับพื้นผิวของสาหร่ายซึ่งเป็นตัวดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะเริ่มลดลง เนื่องจากสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด มีอัตราการคายมากกว่าอัตราการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน (นิพนธ์ และคณะ, 2550)

5. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออน และไอโซเทอร์มการดูดซับไอโรออน (II) ไอออน

5.1 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนต่อการดูดซับของสาหร่ายหางกระรอก

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน คือ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 9 และใช้สาหร่ายหางกระรอกปริมาณ 3 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 90 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 28 และตารางผนวกที่ 9

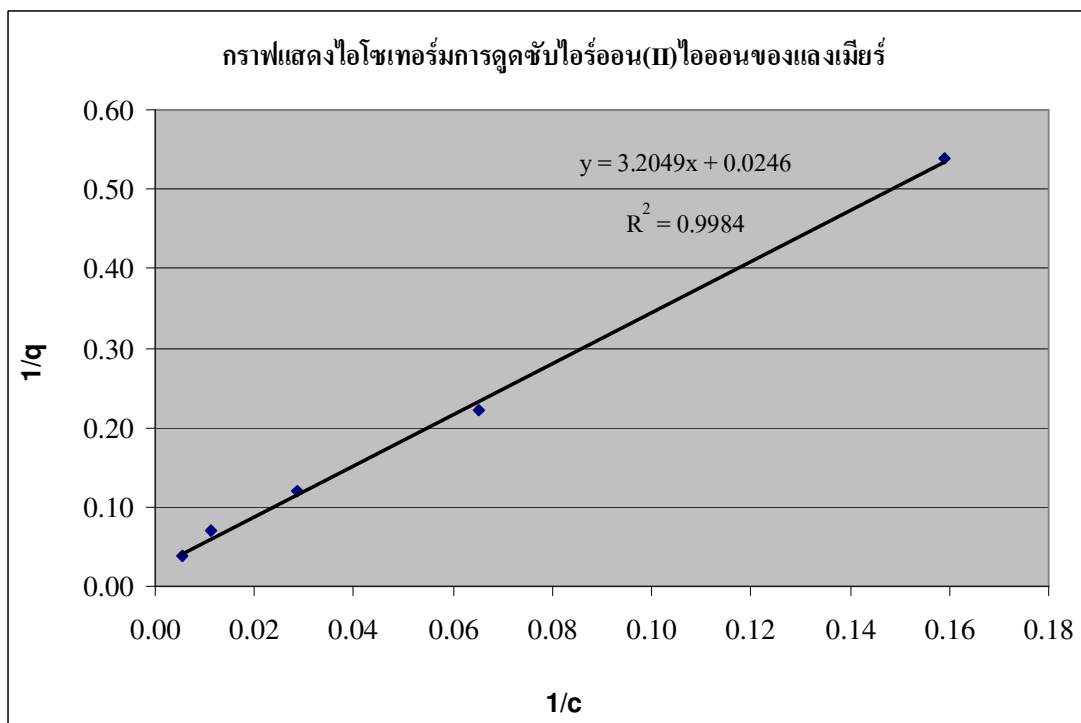


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอโรออน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับไอโรออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก

จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอโรออน (II) ไอออนจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอโรออน (II) ไอออนเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sushera (2007) คือ สาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมสูง เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมอยู่ในระดับต่ำ ส่วนการทดลองในครั้งนี้ พบว่า สาหร่ายหางกระรอกสามารถดูดซับไอโรออน (II) ไอออนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ได้สูงที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.08 สำหรับความเข้มข้น

200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับหากระรอกสามารถดูดซับไอร้อน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 93.35, 91.34, 88.34 และ 86.90 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหากระรอกจะลดลง เนื่องจาก ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนเพิ่มขึ้น ก็แสดงว่า มีเนื้อสารของไอร้อน (II) ไอออนเพิ่มขึ้นด้วย แต่พื้นที่ผิวของสาหร่ายหากระรอกมีจำนวนจำกัด คือ ปริมาณ 3 กรัม จึงทำให้มีโมเลกุลของไอร้อน (II) ไอออนเป็นจำนวนมากที่สาหร่ายหากระรอกไม่สามารถดูดซับไว้ได้บนพื้นที่ผิวก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหากระรอก เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาพล็อตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนมีค่าเท่ากับ 0.9984 และ 0.9827 ตามลำดับ ดังนั้นการดูดซับ ไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายหากระรอกจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว



ภาพที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สาหร่ายหางกระรอก

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของแลงเมียร์โดยทั่วไปคือ

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 19

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (19)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 3.2049 \frac{1}{C} + 0.0246 \quad \text{----- (20)}$$

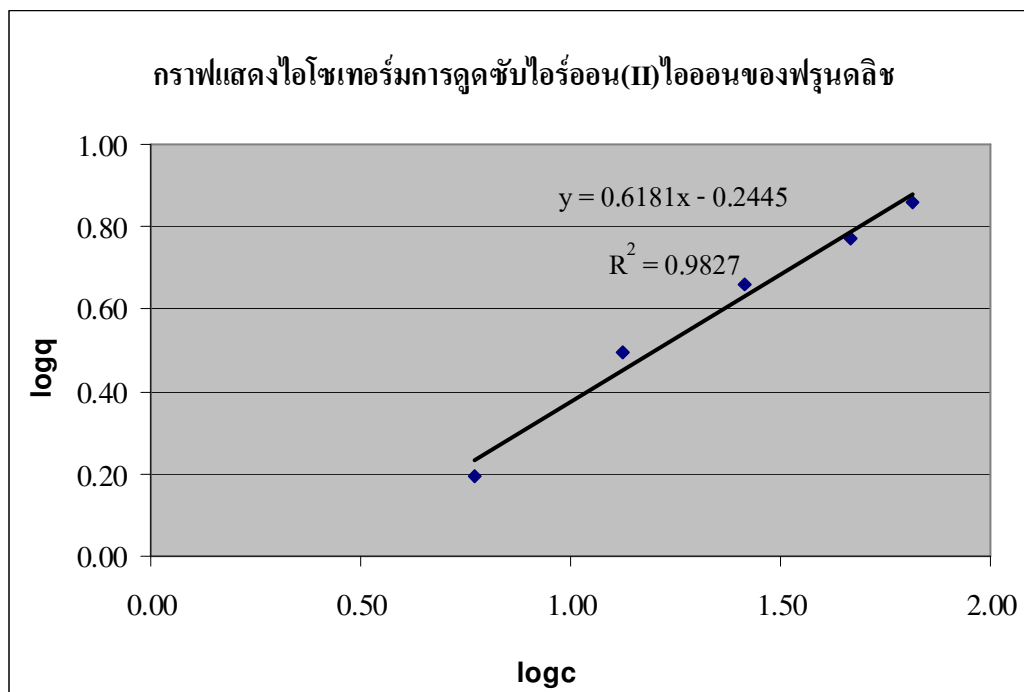
จากสมการที่ 20 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 3.2049 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.0246 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 3.2049$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.0246$$

$$q_m = 40.65$$

$$K = 12.68$$



ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของฟรอนคลิชโดยใช้สาหร่ายหางกระรอก

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของฟรอนคลิชโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 21

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{----- (21)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = -0.2445 + 0.6181 \log C \quad \text{----- (22)}$$

จากสมการที่ 22 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6181 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.2445 นั่นคือ

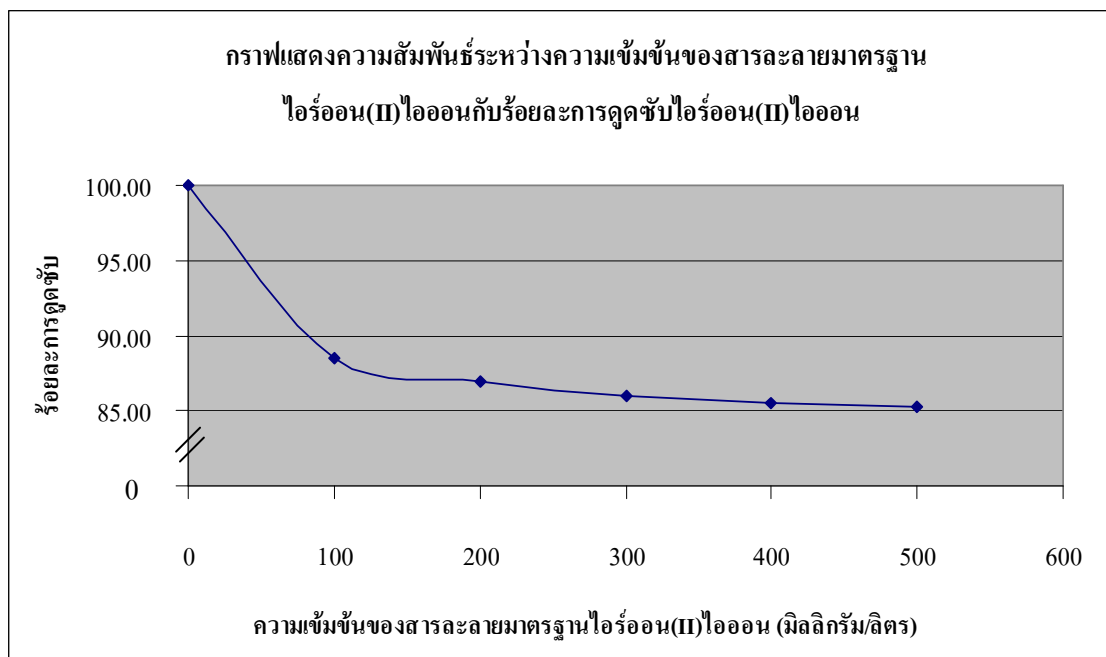
$$\log K = -0.2445$$

$$1/n = 0.6181$$

$$n = 1.62$$

5.2 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนในการดูดซับของสาหร่ายพวงพะโค

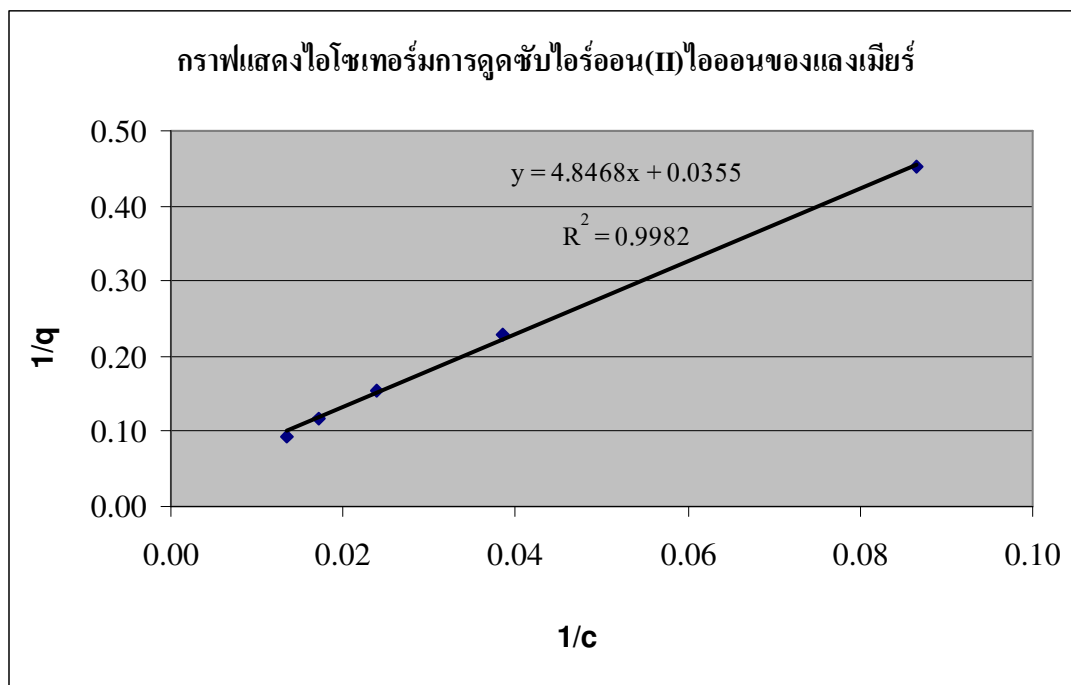
การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอรีออน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน คือ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 8 และใช้สาหร่ายพวงพะโคปริมาณ 2 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 90 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 31 และตารางผนวกที่ 11



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอรีออน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงพะโค

จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Keskinan (2003) คือ สาหร่ายพวงชะโดมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว สังกะสี และทองแดงสูง เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดอยู่ในระดับต่ำ ส่วนการทดลองในครั้งนี้ พบว่า สาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ได้สูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 88.46 สำหรับความเข้มข้นที่ 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร สาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้เท่ากับร้อยละ 86.98, 86.00, 85.47 และ 85.23 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโดจะลดลง เนื่องจาก ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนเพิ่มขึ้น ก็แสดงว่า มีโมเลกุลของไอร์ออน (II) ไอออนเพิ่มขึ้นด้วย แต่พื้นที่ผิวของสาหร่ายพวงชะโดมีจำนวนจำกัด คือ ปริมาณ 2 กรัม จึงทำให้มีโมเลกุลของไอร์ออน (II) ไอออนเป็นจำนวนมากที่สาหร่ายพวงชะโดไม่สามารถดูดซับไว้ได้บนพื้นที่ผิวก่อนที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับ

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาพล็อตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 32 และ 33 ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนทั้ง 2 แบบ มีค่าเท่ากับ 0.9982 และ 0.9990 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโดจึงสอดคล้องทั้งสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แต่ทั้งนี้กลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดลิชมากกว่า เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของฟรุนดลิช (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (heterogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับต่างกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้นี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 32 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้สาหร่ายพวงชะโด

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับไอร่อน (II) ไอออนของแลงเมียร์โดยทั่วไป คือ

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 23

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (23)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 4.8468 \frac{1}{C} + 0.0355 \quad \text{----- (24)}$$

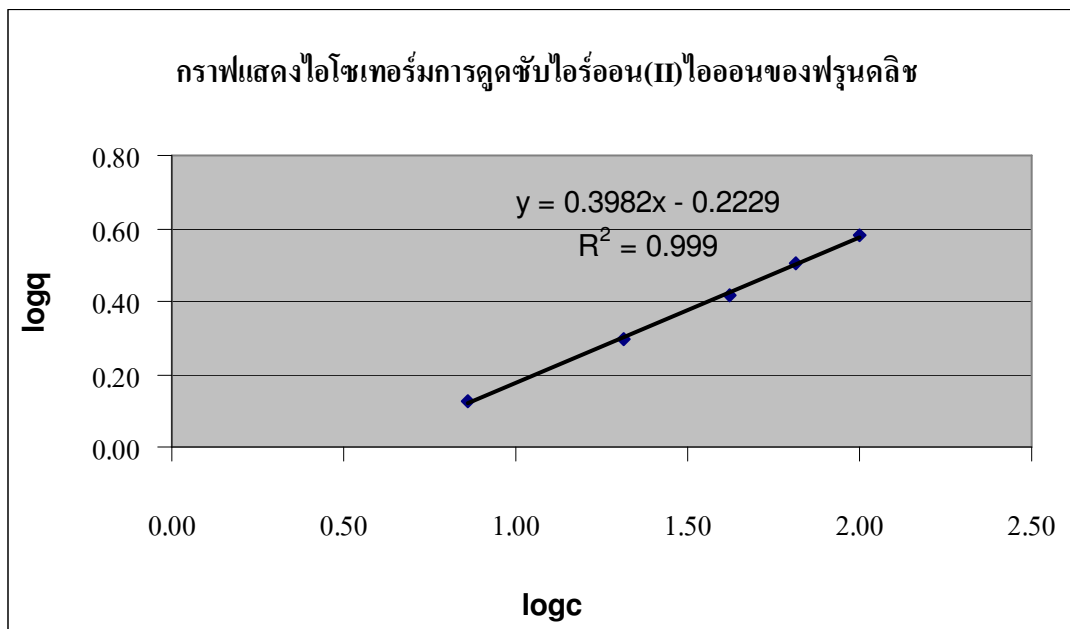
จากสมการที่ 24 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 4.8468 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.0355 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 4.8468$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.0355$$

$$q_m = 28.17$$

$$K = 5.81$$



ภาพที่ 33 ไอโซเทอร์มการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของฟรอนด์ลิซโดยใช้สาหร่ายพวงพะ โด

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของฟรอนด์ลิซโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 25

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{-----} \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = -0.2229 + 0.3982 \log C \quad \text{-----} \quad (26)$$

จากสมการที่ 26 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.3982 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.2229 นั่นคือ

$$\log K = -0.2229$$

$$1/n = 0.3982$$

$$n = 2.51$$

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในการดูดซับ
ไอรีออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศ

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช		
	K	q_m	R^2	K	n	R^2
สาหร่ายหางกระรอก	12.68	40.65	0.9984	0.57	1.62	0.9827
สาหร่ายพวงกะโศ	5.81	28.17	0.9982	0.60	2.51	0.9990

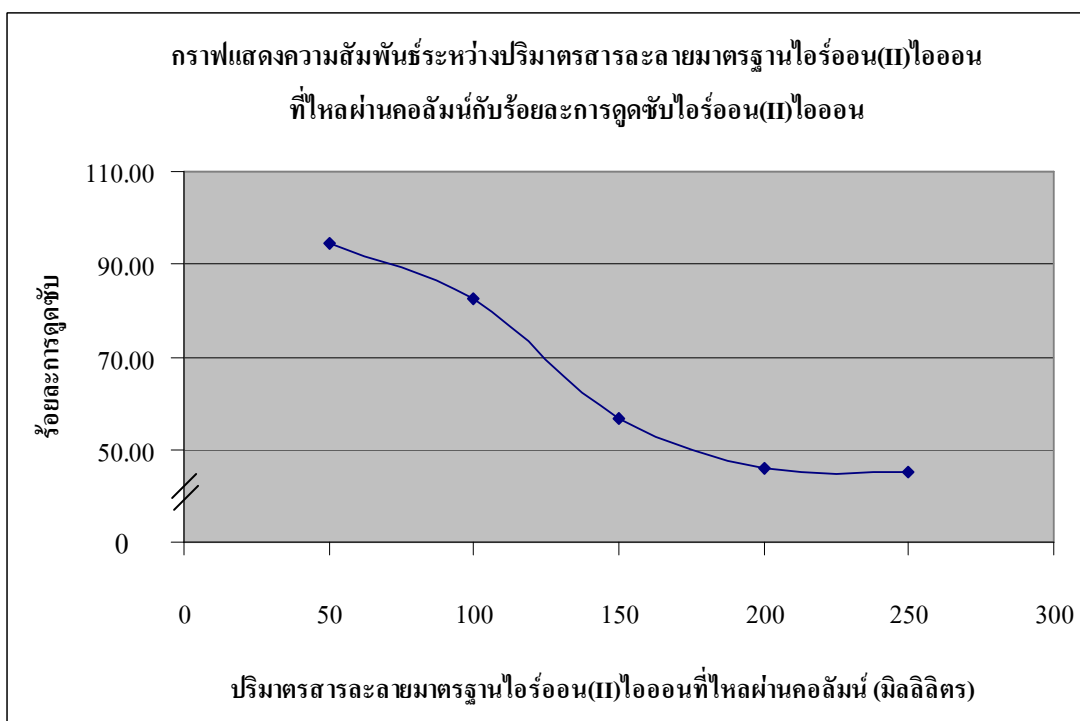
จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าในการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิช โดยสาหร่ายหางกระรอกมีค่าการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนเป็นไปตามสมการแลงเมียร์มากกว่าสาหร่ายพวงกะโศ ซึ่งสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศสามารถดูดซับไอรีออน (II) ไอออนได้สูงสุดเท่ากับ 40.65 และ 28.17 ตามลำดับ ส่วนสาหร่ายพวงกะโศมีค่าการดูดซับไอรีออน (II) ไอออนเป็นไปตามสมการฟรุนดลิชมากกว่าสาหร่ายหางกระรอก จากการศึกษาของ Trayball (1980) พบว่า n บอกถึงปริมาณพื้นที่ผิวของสาหร่าย ซึ่งค่า n ควรอยู่ในช่วง 1 – 10 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้ และจากการศึกษาของ Sushera (2007) สาหร่ายหางกระรอกสามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงสุดเท่ากับ 15.0 มิลลิกรัม/กรัม ส่วนการศึกษาของ Keskinan (2003) พบว่า สาหร่ายพวงกะโศสามารถดูดซับทองแดง สังกะสี และตะกั่วได้สูงสุดเท่ากับ 6.17, 13.98 และ 44.8 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

6. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

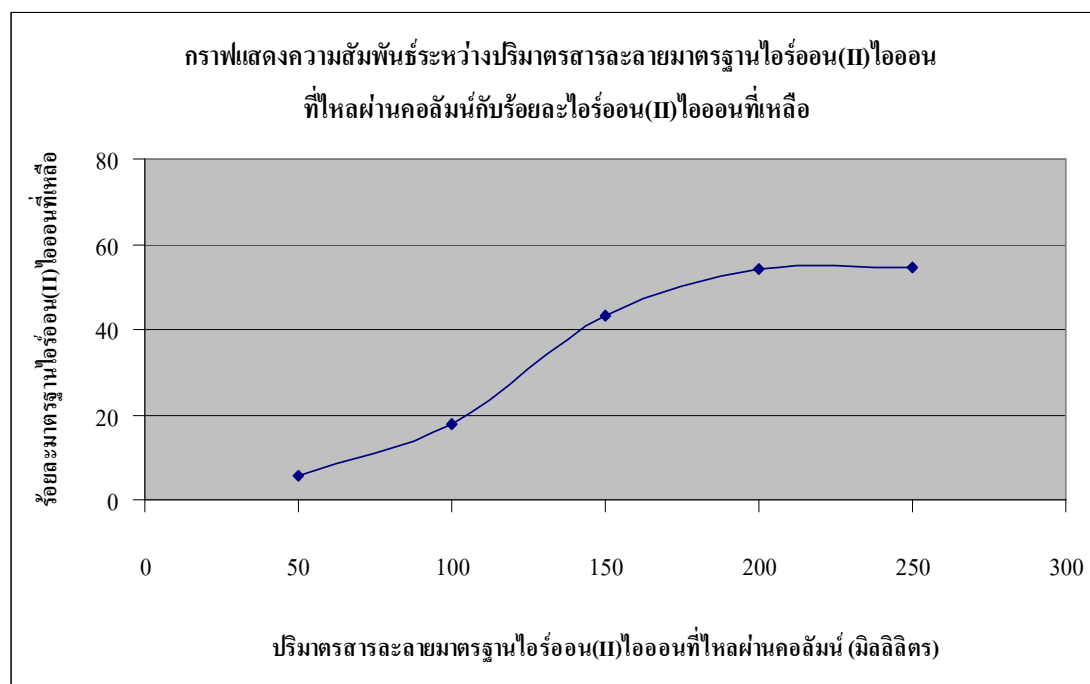
6.1 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ของสารละลายทางกระรอก

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชของไอออน (II) ไอออนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 9 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุสารละลายทางกระรอกจำนวน 20 กรัม แล้วเก็บสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออน จากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออน (II) ไอออน ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

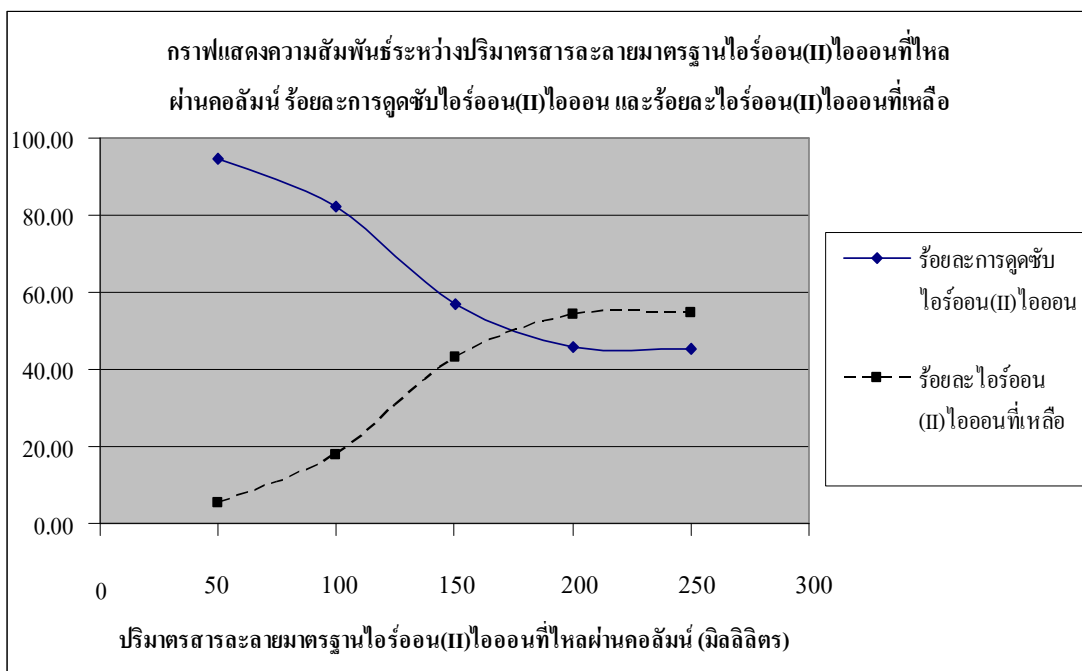
จากการทดลอง พบว่า ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านสารละลายทางกระรอกในคอลัมน์ช่วงแรก คือ 50 มิลลิลิตร สารละลายทางกระรอกมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออน (II) ไอออนสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 94.49 ซึ่งเห็นได้จากปริมาณของไอออน (II) ไอออนที่เหลืออยู่จะน้อย มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.51 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับไอออน (II) ไอออนของสารละลายทางกระรอกจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของสารละลายทางกระรอกมีการดูดซับไอออน (II) ไอออนเอาไว้ ในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปสารละลายทางกระรอกจะเริ่มอิ่มตัวและและหมดสภาพไปในที่สุด ดังภาพที่ 34, 35, 36



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนที่ไหลผ่าน
คอลัมน์กับร้อยละการดูดซับไอโรออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนที่ไหลผ่าน
คอลัมน์กับร้อยละไอโรออน (II) ไอออนที่เหลือ ของสาหร่ายหางกระรอก



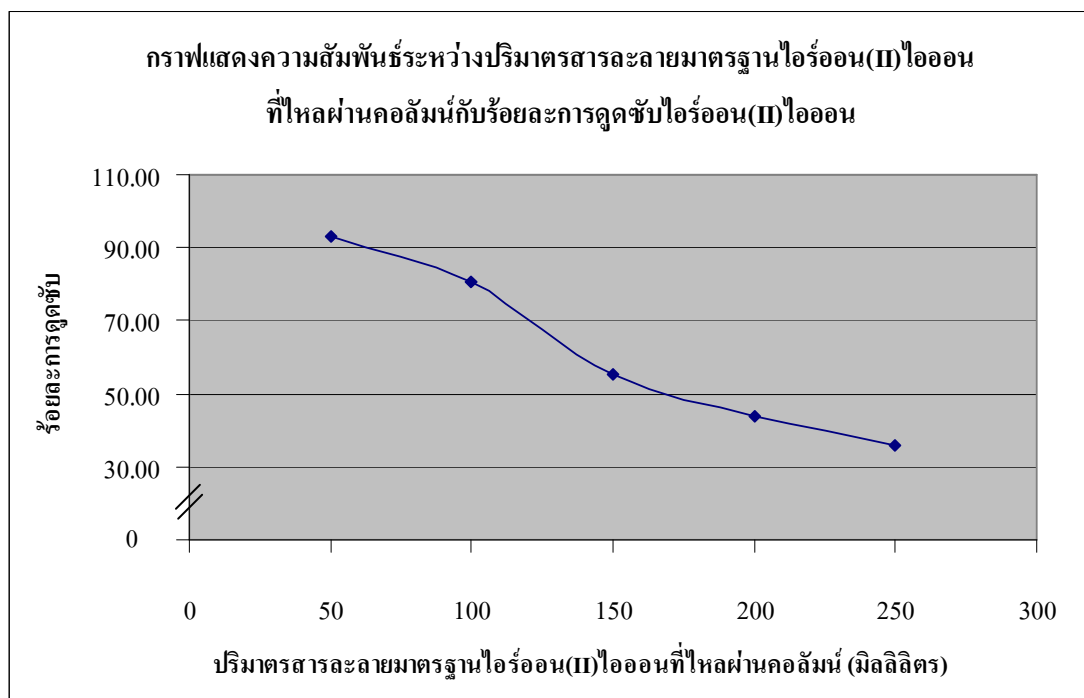
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับไอโรออน (II) ไอออน และร้อยละไอโรออน (II) ไอออนที่เหลือของสาหร่ายหางกระรอก

6.2 ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนโดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ของสาหร่ายพวงชะโด

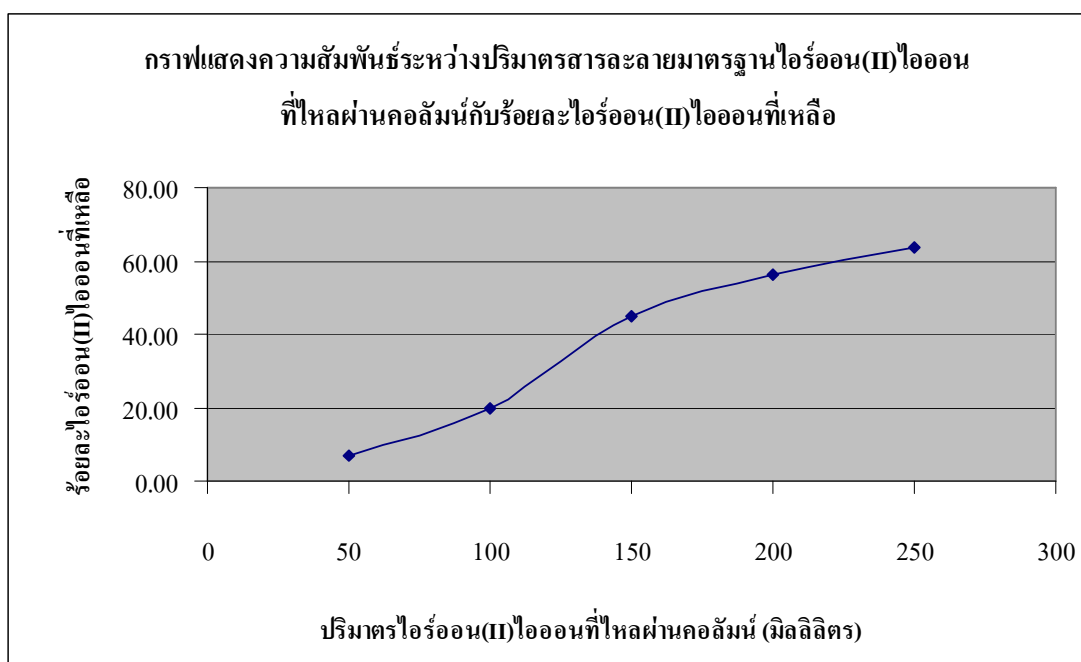
การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 8 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุสาหร่ายพวงชะโดจำนวน 20 กรัม แล้วเก็บสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออน ทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับไอโรออน (II) ไอออน ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

จากการทดลอง พบว่า ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอโรออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านสาหร่ายพวงชะโดในคอลัมน์ช่วงแรก คือ 50 มิลลิลิตร สาหร่ายพวงชะโดมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโรออน (II) ไอออนสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 93.23 ซึ่งเห็นได้จากปริมาณของไอโรออน (II) ไอออนที่เหลืออยู่จะน้อย มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.77 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยไอโรออน (II) ไอออนผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับไอโรออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด

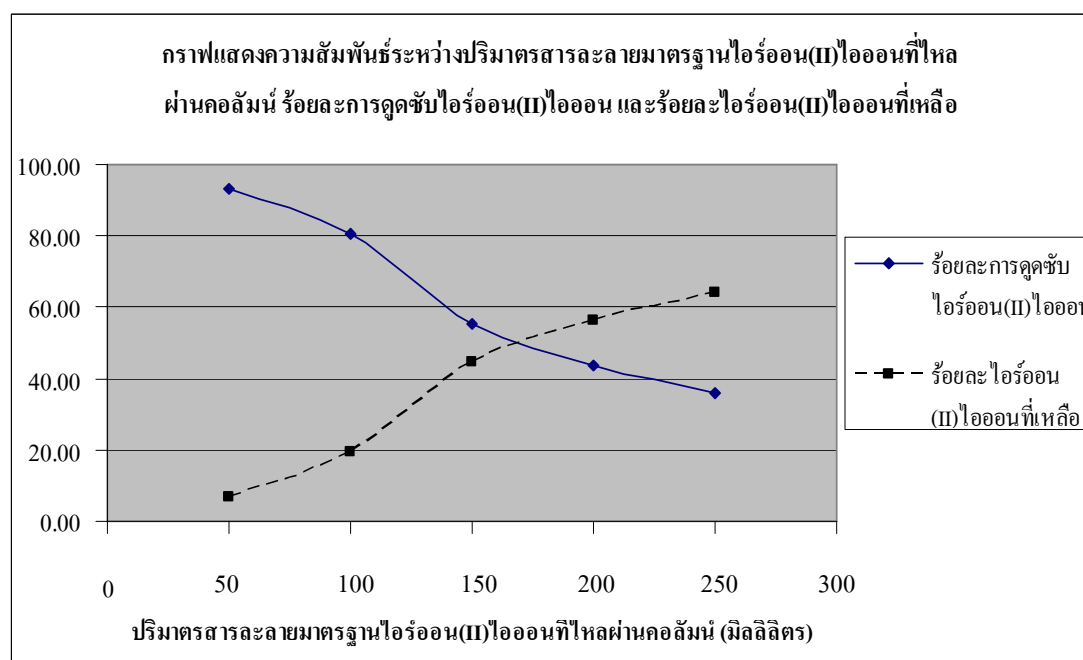
จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของสาหร่ายพวงชะโดมีการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนเอาไว้ ในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปสาหร่ายพวงชะโดจะเริ่มอิ่มตัวและและหมดสภาพไปในที่สุด ดังภาพที่ 37, 38, 39



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร้อน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอโอรอน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์กับร้อยละไอโอรอน (II) ไอออนที่เหลือ ของสาหร่ายพวงกะโด

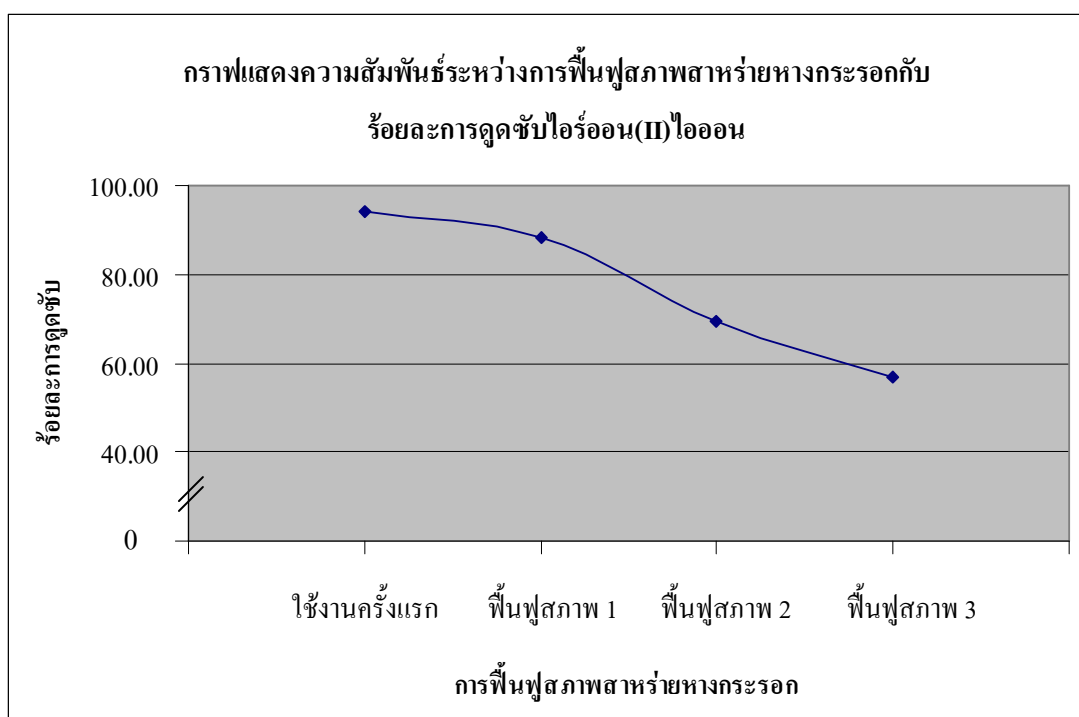


ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอโอรอน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับไอโอรอน (II) ไอออน และร้อยละไอโอรอน (II) ไอออนที่เหลือ ของสาหร่ายพวงกะโด

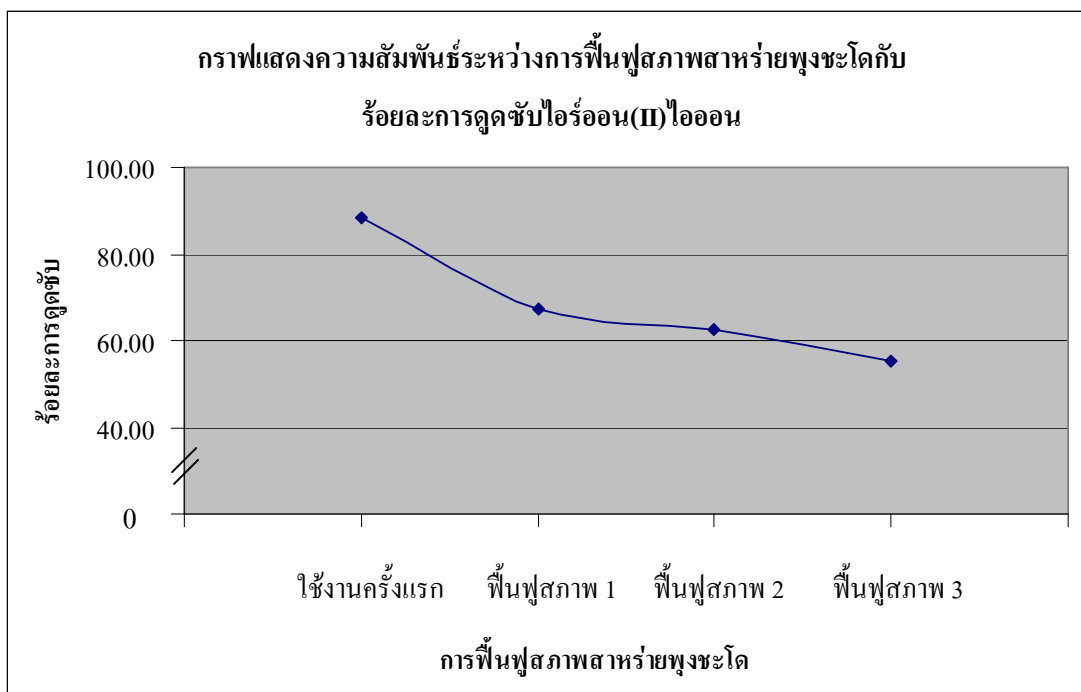
การดูดซับไออนในสารละลายมาตรฐานไออน (II) ไออนโดยทำการทดลองแบบคอลัมน์เป็นการทดลองแบบต่อเนื่อง (Sushera, 2007) พบว่า สาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพในการดูดซับไออน (II) ไออนได้ดีกว่าสาหร่ายพวงชะโด

7. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดที่ผ่านการใช้งานแล้ว

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานไออน (II) ไออนความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 9 ใช้สาหร่ายหางกระรอกโดยผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้วปริมาณ 3 กรัม และพีเอช 8 ใช้สาหร่ายพวงชะโดโดยผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้วปริมาณ 2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 90 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับไออน (II) ไออน โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสาหร่ายหางกระรอกที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 40 และ 41



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพสาหร่ายหางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไออน (II) ไออน

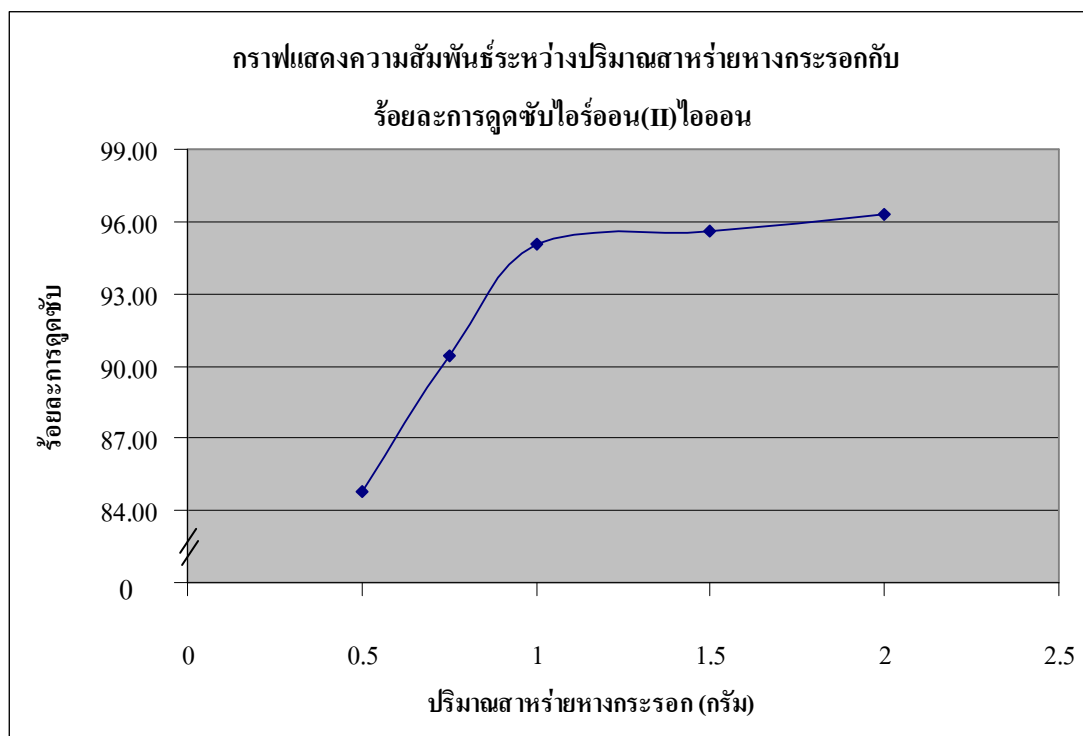


ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน

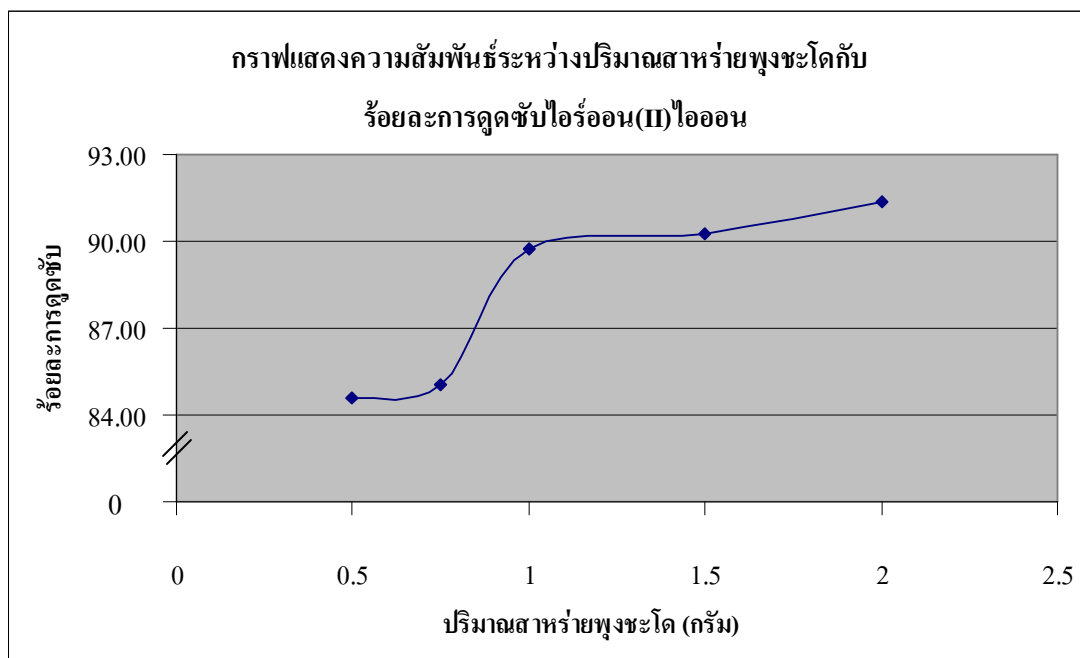
จากผลการทดลองเมื่อนำสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมาทำการฟื้นฟูสภาพ โดยนำสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด มาล้างด้วย HCl 0.1 โมลาร์ เนื่องจาก HCl สามารถล้างเหล็กที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสาหร่ายได้ดีกว่า HNO_3 , H_2SO_4 และ EDTA (Saeed, 2003) และทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไอร์ออนในสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออน พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดที่ใช้งานครั้งแรก เนื่องจาก HCl จะไปทำลายโครงสร้างของ polysaccharides เช่น เฮมิเซลลูโลส ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออน และเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสด้วย ดังนั้น เมื่อ polysaccharides ถูกทำลาย บริเวณที่เกิดกระบวนการดูดซับของสาหร่ายก็ลดลงด้วย และนอกจากนี้พื้นที่ผิวของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด จะมีจำนวนลดลง เพราะพื้นที่ผิวบางส่วนจะสูญเสียและถูกไอร์ออน (II) ไอออนทำลายไปในขณะที่เกิดกระบวนการดูดซับก่อนการฟื้นฟูสภาพ (Puranik *et al.*, 1999)

8. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนในน้ำเสียจากบริษัทผลิตภัณฑ์ และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ ของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศก

การทดลองนี้จะใช้น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนไอร้อน (II) ไอออนจากบริษัทผลิตภัณฑ์ 3 แห่ง และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ 1 แห่ง โดยนำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ จนได้พีเอช 8 และ 9 ใช้สาหร่ายพวงกะโศกและสาหร่ายหางกระรอกปริมาณ 1 กรัม (เนื่องจากน้ำเสียที่เก็บจากโรงงานทั้ง 4 แห่ง มีความเข้มข้นของไอร้อน (II) ไอออนอยู่ในช่วง 10 – 30 มิลลิกรัม/ลิตร จึงทำการทดลองหาปริมาณของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศกที่เหมาะสม เพื่อใช้ดูดซับไอร้อน (II) ไอออนที่มีความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งได้ปริมาณสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศกที่เหมาะสมเป็นจำนวน 1 กรัม ดังภาพที่ 42 และ 43 ตามลำดับ) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 90 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับไอร้อน (II) ไอออน ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 6



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาหร่ายหางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออน



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอร้อน (II) ไอออน

ตารางที่ 6 การดูดซับไอร้อน (II) ไอออนในน้ำเสียจากบริษัทผลิตรถยนต์และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ ของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด

ประเภทบริษัท	ปริมาณไอร้อน(II) ไอออน ก่อนดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ของสาหร่าย หางกระรอก	ร้อยละการดูดซับ ของสาหร่าย พวงชะโด
บ.ผลิตรถยนต์ A	16.48	94.54	88.77
บ.ผลิตรถยนต์ B	15.06	93.56	88.65
บ.ผลิตรถยนต์ C	20.28	92.21	90.68
บ.ผลิตอิเล็กทรอนิกส์	11.81	95.26	91.94

จากตารางที่ 6 น้ำตัวอย่างที่เก็บมาจากบริษัทผลิตรถยนต์ A, B, C และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ มีความเข้มข้นของไอร้อน (II) ไอออนปนเปื้อนอยู่ 16.48, 15.06, 20.28 และ 11.81 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เมื่อนำน้ำเสียมาทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับไอร้อน (II) ไอออนโดยใช้สาหร่ายหางกระรอก พบว่า สาหร่ายหางกระรอกปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับไอร้อน (II) ไอออนได้ร้อยละ 95.54, 93.56, 92.21 และ 95.26 ตามลำดับ ส่วน

สาหร่ายพวงพะโคปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนได้ร้อยละ 88.77, 88.65, 90.68 และ 91.94 ตามลำดับ

ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจากบริษัทผลิตภัณฑ์และบริษัทผลิตอิเล็กทรอนิกส์ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอกจะสูงกว่าสาหร่ายพวงพะโค ซึ่งใช้สาหร่ายทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 1 กรัม และประสิทธิภาพการดูดไอร์ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจริงก็มีค่าใกล้เคียงกับการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร สาหร่ายทั้ง 2 ชนิดนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนที่มีอยู่ในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนและน้ำเสียจากโรงงานที่สภาวะเหมาะสม ด้วยสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด โดยทำการทดลองแบบแบตช์และคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากบริเวณนี้จะประกอบด้วยโพลีแซกคาไรด์ โปรตีน และลิพิด นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของอะมิโน ไฮดรอกซิล และคาร์บอกซิล ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับกับเหล็ก (Vinod, 2008) ประสิทธิภาพในการดูดซับยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พีเอชของสารละลาย ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย โดยสาหร่ายหางกระรอกมีรูปแบบการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนเป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9984 ซึ่งสาหร่ายหางกระรอกสามารถดูดซับไอออน (II) ไอออนได้สูงสุด 40.65 มิลลิกรัม/กรัม ส่วนสาหร่ายพวงชะโดมีรูปแบบการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอออน (II) ไอออนเป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิช ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8882 และ 0.9990 ตามลำดับ ซึ่งสาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซับไอออน (II) ไอออนได้สูงสุด 28.17 มิลลิกรัม/กรัม

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมาในครั้งนี้ ทำให้ทราบข้อมูลบางอย่าง เพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจดังนี้

1. ควรมีการกำจัดสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโดที่ผ่านการใช้งานแล้วอย่างเหมาะสม โดยนำสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดมาตากให้แห้ง แล้วนำไปเป็นปุ๋ย เนื่องจากสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ไนโตรเจน

2. ควรมีการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงชะโด โดยวิธี BET (Brunauer, Emmett and Teller) ด้วยเครื่อง Autosorb

3. ควรมีการศึกษานาครุพจน์ของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโศก โดยใช้ SEM (scanning electron microscope) ทั้งก่อนและหลังนำสาหร่ายมาใช้ดูดซับสาร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตินันท์ คงสืบชาติ. 2546. ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวซีเลื่อยเพื่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จรงค์ษ์ บุญเอก. 2539. การบำบัดหลัก แอมโมเนีย ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสียชุมชนโดยใช้ดินในสภาพน้ำท่วมขังสลับแห้งร่วมกับการปลูกพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฉัตรไชย รัตนไชย. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ฉัตรสินี สุรเสน. 2545. การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการกรองด้วยเปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชีวิน อรรถสาสน์, วิวัฒน์ เรืองเลิศปัญญากุล และปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์. 2545. การบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งด้วยกระบวนการทางชีวภาพ. การประชุมวิชาการกึ่งทะเลแห่งชาติ ครั้งที่ 4. ระยอง.
- นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์ และคณิดา ดังคนานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ปราณี พันธุมสินชัย. 2542. มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 183 น.
- พัชราภรณ์ ทวีสุวรรณพร. 2545. การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียซีโอไลต์โดยใช้เคลือบโพลีเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณราย รุญเจริญ. 2546. การกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นสารดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ไมตรี ดวงสวัสดิ์, สุเจน บุญไพโรจน์ และประสิทธิ์ ประสาทพรชัย. 2535. ชนิด ปริมาณ การแพร่กระจายพรรณไม้น้ำและสัตว์ที่เกาะอาศัยตามพรรณไม้น้ำในหนองหาร จังหวัดสกลนคร. เอกสารวิชาการ ฉบับที่ 73. สถาบันวิจัยประมงน้ำจืด กรมประมง.

วรชาติ พวงเงิน. 2547. การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลเบื้องต้นโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการทำนา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.

วรพจน์ กนกกันตพงษ์. 2544. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ในการดูดซับอูมิเนียมและเหล็กโดยเปอร์แมงกาเนตไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรวรรณ ฐิติจันทร์. 2544. การทำเฟอร์ริกออกไซด์บริสุทธิ์จากสนิมเหล็ก. การค้นคว้าแบบอิสระเชิงวิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

วางคณา สังสิทธิ์สวัสดิ์. 2539. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

วัฒนา ยุกแผน. 2540. การใช้ด่างทับทิมกำจัดเหล็กในการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

วุฒิพร พรหมขุนทอง. 2538. การใช้สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโศ และผักตบชวาผสมในอาหารเพื่อให้อุณหภูมิปลาตะเพียนขาว, *Puntius gonionotus* Bleeker. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

สมชัย อวเกียรติ. 2541. การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่วของสาหร่ายหางกระรอก. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ.

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

สุชีรา บรรลือสินธุ์. 2547. การบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียมโดยใช้พืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2530. **พรรณไม้น้ำ**. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

เสาวภา พลานนท์. 2544. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออน (II) ไอออน บนถ่านกระดูก และอลูมินากัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อริชัย นพแก้ว. 2543. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุษา สุวรรณสรวล และยุทธการ นูนทะธรรม. 2546. การทดลองใช้หอยกาบน้ำจืด *Hyriopsis (Limnoscapha) myersiana* และสาหร่ายหางกระรอก *Hydrilla verticillata* เพื่อบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพจากบ่อเลี้ยงปลา. ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Adam, V.D. 1990. **Water and Wastewater Examination Manual**. Lewis Publishers INC. Michigan. 64-66.

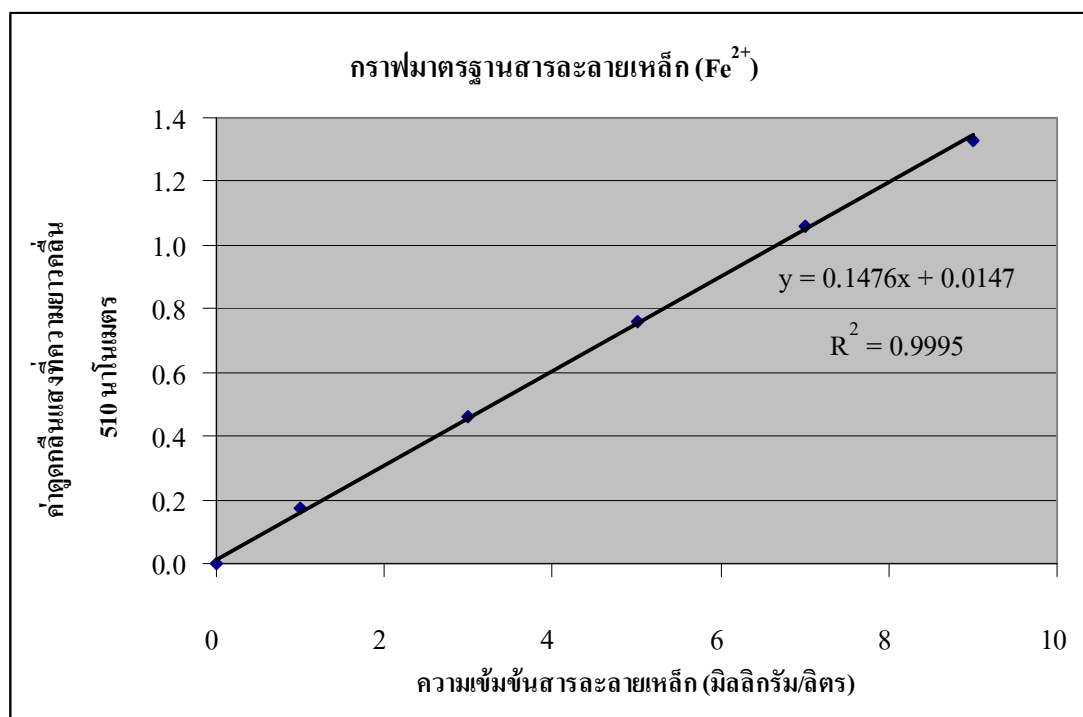
A.O.A.C. 2000. **Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Wasington, D.C.

APHA, AWWA and WEF. 1992. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 18th ed., Washington D.C., United State of America.

- Cohen, J.M., Lamphake, L.J., Harris, E.K. and Woodward, R.L. 1995. **Taste threshold concentrations of metals in drinking water.** J. Am. Water Works Assoc., 52: 660.
- Cruz, C.C.V., Da Costa, A.C.A., Henrique, C.A., and Luna, A.S. 2004. **Kinetic modeling and equilibrium studies during cadmium biosorption by dead *Sargassum* sp. Biomass.** Bioresour. Technol., 249 – 257.
- George, D.C. and Florence E.C. 2001. **Patty's industrial hygiene and toxicology.** 3th ed. Volume 2A Toxicology. John wileys Sons., Inc. Canada.
- Harvard University. 1997. **Oxygenation of ferrous iron.** Washington D.C., United State of America.
- Maree, J.P., W.F. Strydom and M. De Beer. 1999. **Integrated iron(II) oxidation and limestone neutralization of acid mine water.** Wat. Sci. Tech. Vol.39, No.10-11 : 231-238.
- Maron, S.H. and Prutton, C.F. 1961. **Principle of Physical Chemistry.** 3rd ed. Macmillan, Co. New York.
- Keskinkan, O., Goksu, M.Z.L., Basibuyuk, M., and Foster, C.F. 2004. **Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*).** Bioresour. Technol., 92, 197 – 200.
- Puranik, P.R. and Paknikar, K.M. 1999. **Biosorption of lead, cadmium and zinc by *Citrobactor* strain MCM B-18: characterization studies.** Biotechnol. Prog., 15, 228-237.
- Rehwoldt, R., L. Lasko, C. Shaw, and E. Wirhowski. 1999. **The acute toxicity of some heavy metals ions toward benthic organism.** Bulletin of Environmental Contamination and Toxicity 10: 291-294.

- Saeed, A. and Iqbal, M. 2003. **Bioremoval of cadmium from aqueous solution by black gram husk (*Cicer arietinum*)**. Water Res., 37, 3472 – 3480.
- Sawyer, C.N., and McCarty, P.L., 1989. **Chemistry for sanitary engineers**. McGraw-Hill, New York.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. 1980. **Water Chemistry**. John Wiley and Sons.
- Sushera Bunluesin. 2007. **Batch and continuous packed column studies of cadmium biosorption by *Hydrilla verticillata* biomass**. Journal of bioscience and bioengineering. Vol.103, No.6, 509 – 513.
- Theis, T.L. and P.C. Singer. 1990. **Complexation of iron(II) by organic matter and its effect on iron(II) oxygenation**. Environmental Science and Technology, 8 : 569-573.
- Trayball, R.E. 1980. **Mass transfer operations**. Third ed. McGraw – hill, New York.
- Vinod K. Gupta. 2008. **Biosorption of lead(II) from aqueous solution by non-living algal biomass *Oedogonium* sp. And *Nostoc* sp. – A comparative study**. Biointerfaces 64, 170-178.
- Viswanathan, M.N. and B. Boettcher. 1991. **Biological removal of iron from groundwater**. Wat. Sci. Tech. Vol. 23 : 1437-1446.
- Vitayaudom, Vr. 1987. **Iron removal from water supplies**. Master Thesis, SEATO Graduate School of Engineering, Bangkok.
- Yukphan, Wattana. 1989. **The use of potassium permanganate for iron removal in water treatment**. Master's Thesis Department of Sanitary Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University.

ภาคผนวก



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายไอร่อน (II) ไอออน

ตารางผนวกที่ 1 ค่าพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร่อน (II) ไอออน
ของสารย่ำหางกระรอก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	65.60	65.54	65.60	65.58	0.03	34.40
5	65.13	65.33	65.06	65.17	0.14	34.90
6	60.18	60.05	60.05	60.09	0.08	39.95
7	55.71	55.71	55.64	55.69	0.04	44.29
8	35.79	35.93	35.93	35.88	0.08	64.07
9	14.38	14.32	14.45	14.38	0.07	85.62
10	21.50	21.63	21.50	21.54	0.08	78.50
11	29.70	29.83	29.76	29.76	0.07	70.24
12	32.74	32.74	32.68	32.72	0.03	67.26
13	34.17	34.23	34.10	34.17	0.07	65.83

ตารางผนวกที่ 2 ค่าพีเอชกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์รอน (II)
ไอออนของสาหร่ายพวงพะโค

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	60.86	60.93	61.06	60.95	0.10	39.10
5	54.22	54.15	54.29	54.22	0.07	45.78
6	34.30	34.30	34.17	34.26	0.08	65.70
7	23.73	23.67	23.53	23.64	0.10	76.30
8	19.87	19.74	19.87	19.83	0.08	80.13
9	20.68	20.82	20.75	20.75	0.07	79.25
10	27.12	26.99	26.99	27.03	0.08	73.01
11	36.40	36.40	36.40	36.40	0.00	63.60
12	37.35	37.22	37.08	37.22	0.14	62.78
13	38.71	38.71	38.84	38.75	0.08	61.29

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณสาหร่ายทางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์รอน (II) ไอออน

ปริมาณสาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	20.96	20.89	20.89	20.91	0.04	79.11
1.0	16.96	16.89	16.89	16.91	0.04	83.11
2.0	13.23	13.16	13.23	13.21	0.04	86.77
3.0	10.99	11.06	10.99	11.01	0.04	89.01
4.0	9.64	9.51	9.78	9.64	0.14	90.36
5.0	8.42	8.49	8.49	8.47	0.04	91.51

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐาน
ไอร์รอน (II) ไอออน

ปริมาณสาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	23.53	23.67	23.60	23.60	0.07	76.40
1.0	19.74	19.67	19.74	19.72	0.04	80.26
2.0	14.86	14.86	15.00	14.91	0.08	85.14
3.0	13.57	13.71	13.64	13.64	0.07	86.36
4.0	12.01	12.01	12.01	12.01	0.00	87.99
5.0	11.74	11.81	11.67	11.74	0.07	88.26

ตารางผนวกที่ 5 ระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐาน
ไอร์รอน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก

ระยะเวลา ปั่นกวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	11.00	10.93	10.79	10.91	0.11	89.03
60	8.49	8.42	8.42	8.44	0.04	91.58
90	5.85	5.85	5.85	5.85	0.00	94.15
120	6.25	6.12	6.05	6.14	0.10	93.71
150	6.46	6.46	6.39	6.44	0.04	93.54
180	7.54	7.61	7.41	7.52	0.10	92.42

ตารางผนวกที่ 6 ระยะเวลาปั่นกวนกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐาน
ไอร้ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด

ระยะเวลา ปั่นกวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	14.93	14.86	15.00	14.93	0.07	85.07
60	13.98	13.98	14.11	14.02	0.08	86.02
90	11.61	11.47	11.40	11.49	0.11	88.56
120	12.76	12.62	12.83	12.74	0.11	87.20
150	15.00	14.86	15.00	14.95	0.08	87.00
180	15.20	15.26	15.26	15.24	0.03	86.95

ตารางผนวกที่ 7 ระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐาน
ไอร้ออน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก

ระยะเวลา สัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	6.66	6.52	6.80	6.66	0.14	93.34
30	5.92	5.85	5.85	5.87	0.04	94.15
60	6.80	6.80	6.93	6.84	0.08	93.20
90	7.95	7.88	8.01	7.95	0.07	92.05
120	8.76	8.83	8.83	8.81	0.04	91.17
150	9.03	9.03	9.17	9.08	0.08	90.97
180	9.23	9.23	9.23	9.23	0.00	90.77

ตารางผนวกที่ 8 ระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐาน
ไอร่อน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงชะโด

ระยะเวลา สัมผัส (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	6.66	6.52	6.80	6.66	0.14	93.34
30	5.92	5.85	5.85	5.87	0.04	94.15
60	6.80	6.80	6.93	6.84	0.08	93.20
90	7.95	7.88	8.01	7.95	0.07	92.05
120	8.76	8.83	8.83	8.81	0.04	91.17
150	9.03	9.03	9.17	9.08	0.08	90.97
180	9.23	9.23	9.23	9.23	0.00	90.77

ตารางผนวกที่ 9 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร่อน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับ
ไอร่อน (II) ไอออนของสาหร่ายหางกระรอก

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
100	5.85	5.92	5.98	5.92	0.07	94.08
200	13.37	13.30	13.30	13.32	0.04	93.35
300	25.90	25.97	25.97	25.95	0.04	91.34
400	46.63	46.5	46.77	46.63	0.14	88.34
500	65.67	65.54	65.47	65.56	0.10	86.90

ตารางผนวกที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสาหร่ายหางกระรอก

ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณ สาหร่าย (กรัม)	C ที่ เหลือ	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	logq	logC
100	3	5.92	0.05	1.57	0.6378	0.1689	0.1953	0.7723
200	3	13.32	0.05	3.11	0.3214	0.0752	0.4930	1.1239
300	3	25.95	0.05	4.57	0.2190	0.0385	0.6596	1.4145
400	3	46.63	0.05	5.89	0.1698	0.0214	0.7701	1.6687
500	3	65.56	0.05	7.24	0.1381	0.0153	0.8598	1.8163

ตารางผนวกที่ 11 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนกับร้อยละการดูดซับ
ไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่ายพวงพะโค

ความเข้มข้น (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
100	11.61	11.47	11.81	11.63	0.17	88.46
200	26.17	26.04	26.04	26.08	0.08	86.98
300	42.16	41.96	42.03	42.05	0.10	86.00
400	58.08	57.95	58.15	58.06	0.10	85.47
500	73.73	73.87	74.00	73.87	0.14	85.23

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสาหร่ายพวงกะโด

ความเข้มข้น (มก./ล.)	ปริมาณ สาหร่าย (กรัม)	C ที่ เหลือ	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	logq	logC
100	2	11.54	0.05	2.21	0.4522	0.0867	0.3447	1.0622
200	2	26.04	0.05	4.35	0.2299	0.0384	0.6384	1.4156
300	2	41.99	0.05	6.45	0.1550	0.0238	0.8096	1.6231
400	2	58.12	0.05	8.55	0.1170	0.0172	0.9318	1.7643
500	2	73.87	0.05	10.65	0.0939	0.0135	1.0275	1.8685

ตารางผนวกที่ 13 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอร์ออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละ
ไอร์ออน (II) ไอร์ออนที่เหลือ และร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอร์ออนของ
สาหร่ายหางกระรอก

ปริมาตรไอรูออน	ความเข้มข้นที่เหลือ			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละไอรูออน	ร้อยละ		
(II) ไอรูออนที่ไหล	(มิลลิกรัม/ลิตร)							(II) ไอรูออนที่	การดูด
ผ่านคอลัมน์	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่						
(มิลลิลิตร)	1	2	3						
50	5.51	5.44	5.58	5.51	0.07	5.51	94.49		
100	17.64	17.43	17.57	17.55	0.11	17.61	82.39		
150	43.18	43.18	43.11	43.16	0.04	43.18	56.82		
200	54.15	54.29	54.22	54.22	0.07	54.22	45.78		
250	54.63	54.76	54.70	54.70	0.07	54.70	45.30		

ตารางผนวกที่ 14 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละ
ไอร์ออน (II) ไอออนที่เหลือ และร้อยละการดูดซับไอร์ออน (II) ไอออนของ
สาหร่ายพวงพะโค

ปริมาตรไอร้ออน (II) ไอออนที่ไหล ผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละไอร้ออน (II) ไอออนที่ เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่				
	1	2	3				
50	6.59	6.80	6.73	6.71	0.11	6.77	93.23
100	19.67	19.60	19.60	19.62	0.04	19.60	80.40
150	44.74	44.74	44.87	44.78	0.08	44.74	55.26
200	56.32	56.19	56.32	56.28	0.08	56.32	43.68
250	63.91	63.91	63.71	63.84	0.12	63.91	36.09

ตารางผนวกที่ 15 การดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ไอออนของสาหร่าย
หางกระรอกโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ใช้งานครั้งแรก	5.92	5.85	5.58	5.87	0.04	94.15
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	11.94	11.88	12.08	11.97	0.10	88.09
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	30.64	30.64	30.78	30.69	0.08	69.36
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	43.38	43.18	43.31	43.29	0.10	56.65

ตารางผนวกที่ 16 การดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐานไอร็อน (II) ไอออนของสารละลาย
พวงชะโดโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ใช้งานครั้งแรก	11.47	11.61	11.54	11.54	0.07	88.46
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	32.68	32.68	32.61	32.66	0.04	67.32
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	37.35	37.22	37.28	37.28	0.07	62.72
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	44.60	44.60	44.74	44.65	0.08	55.4

ตารางผนวกที่ 17 ปริมาณสารละลายทางกระรอกกับร้อยละการดูดซับไอออนในสารละลายมาตรฐาน
ไอร็อน (II) ไอออนความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร

ปริมาณสารละลาย (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	4.42	4.56	4.56	4.51	0.08	84.80
0.75	2.87	2.73	3.00	2.87	0.14	90.43
1.0	1.44	1.51	1.65	1.53	0.11	95.07
1.5	1.38	1.31	1.24	1.31	0.07	95.63
2.0	1.10	1.10	1.24	1.15	0.08	96.33

ตารางผนวกที่ 18 ปริมาณสาหร่ายพวงชะโดกับร้อยละการดูดซับไออนในสารละลายมาตรฐาน
ไออน (II) ไออนความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร

ปริมาณสาหร่าย (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	4.42	4.63	4.63	4.56	0.08	84.57
0.75	4.56	4.42	4.49	4.49	0.14	85.03
1.0	2.93	3.07	3.07	3.02	0.11	89.77
1.5	2.93	2.93	2.93	2.93	0.07	90.23
2.0	2.59	2.73	2.59	2.64	0.08	91.37

ตารางผนวกที่ 19 การดูดซับไออน (II) ไออนในน้ำเสียจาก บริษัทผลิตรถยนต์ และบริษัทผลิต
อิเล็กทรอนิกส์ของสาหร่ายหางกระรอก

บริษัท	ความเข้มข้นไออน (II) ไออน (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูด ซับ
	ก่อน	หลัง	หลัง	หลัง			
	ดูดซับ	ดูดซับ 1	ดูดซับ 2	ดูดซับ 3			
รถยนต์ A	16.48	0.9	0.97	0.83	0.90	0.07	94.54
รถยนต์ B	15.06	0.83	0.97	0.97	0.92	0.08	93.56
รถยนต์ C	20.28	1.58	1.65	1.51	1.58	0.07	92.21
อิเล็กทรอนิกส์	11.81	0.56	0.56	0.77	0.63	0.12	95.26

ตารางผนวกที่ 20 การดูดซับไอร้ออน (II) ไอออนในน้ำเสียจาก บริษัทผลิตรถยนต์ และบริษัท
ผลิตอิเล็กทรอนิกส์ของสาหร่ายพวงพะโค

บริษัท	ความเข้มข้นไอร้ออน (II) ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูด ซับ
	ก่อน	หลัง	หลัง	หลัง			
	ดูดซับ	ดูดซับ 1	ดูดซับ 2	ดูดซับ 3			
รถยนต์ A	16.48	1.92	1.85	1.78	1.85	0.07	88.77
รถยนต์ B	15.06	1.78	1.71	1.71	1.73	0.04	88.65
รถยนต์ C	20.28	1.85	2.05	1.92	1.94	0.10	90.68
อิเล็กทรอนิกส์	11.81	1.04	1.04	1.17	1.08	0.08	91.94

ตารางผนวกที่ 21 แสดงคุณภาพของน้ำตัวอย่างจากบริษัทผลิตรถยนต์ A, B,C และบริษัทผลิต
อิเล็กทรอนิกส์

พารามิเตอร์	ค่าคุณภาพน้ำก่อนบำบัด				ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม
	บ. A	บ. B	บ. C	บ.อิเล็กทรอนิกส์	
pH	8.5	11.0	2.9	5.6	5.5 – 9.0
Temp (องศาเซลเซียส)	26.5	30.5	35	28.5	40
EC (ไมโครซีเมนส์)	223	1,570	1,126	440	2,000
TDS (มก./ล.)	112	785	562	223	3,000
TSS (มก./ล.)	102	374	311	76	50
Turbidity (NTU)	190	352	1,044	394	ไม่ได้กำหนด
BOD (มก./ล.)	8	15	30	20	20
COD (มก./ล.)	120	428	856	64	120
Hardness (มก./ล. ของ CaCO ₃)	230	1,110	1,000	1,780	ไม่ได้กำหนด
Alkalinity (มก./ล. ของ CaCO ₃)	123.75	897.5	83.75	18	ไม่ได้กำหนด
Sulfate (%)	0.07	0.07	0.0.8	0.05	ไม่ได้กำหนด
Sulfide (มก./ล.)	-	-	-	0.52	1.0

ตารางผนวกที่ 22 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD

สาหร่ายหางกระรอก		สาหร่ายพวงกะโ	
ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน	ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน
4	34.40 ^A	4	39.10 ^A
5	34.90 ^B	5	45.78 ^B
6	39.95 ^C	6	65.70 ^C
7	44.29 ^D	7	76.30 ^D
8	64.07 ^E	8	80.13 ^E
9	85.62 ^F	9	79.25 ^F
10	78.50 ^G	10	73.01 ^G
11	70.24 ^H	11	63.60 ^H
12	67.26 ^I	12	62.78 ^I
13	65.83 ^J	13	61.29 ^J

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับไอร้ออน (II) ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 23 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายทางสถิติโดยวิธี LSD

สาหร่ายหางกระรอก		สาหร่ายพวงกะโศ	
ปริมาณสาหร่าย (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน	ปริมาณสาหร่าย (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน
0.5	79.11 ^A	0.5	76.40 ^A
1.0	83.11 ^B	1.0	80.26 ^B
2.0	86.77 ^C	2.0	85.14 ^C
3.0	89.01 ^D	3.0	86.36 ^D
4.0	90.36 ^E	4.0	87.99 ^E
5.0	91.51 ^F	5.0	88.26 ^F

หมายเหตุ XX^X: ร้อยละการดูดซับไอร้ออน (II) ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 24 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวทางสถิติโดยวิธี LSD

สาหร่ายหางกระรอก		สาหร่ายพวงกะโศ	
ระยะเวลาปั่นกว (นาท)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน	ระยะเวลาปั่นกว (นาท)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน
30	89.03 ^A	30	85.07 ^A
60	91.58 ^B	60	86.02 ^B
90	94.15 ^C	90	88.56 ^C
120	93.71 ^D	120	87.20 ^D
150	93.54 ^E	150	87.00 ^A
180	92.42 ^F	180	86.95 ^E

หมายเหตุ XX^X: ร้อยละการดูดซับไอร้ออน (II) ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 25 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD

สาหร่ายหางกระรอก		สาหร่ายพวงกะโด	
ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน	ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน
10	93.34 ^A	10	86.26 ^A
30	94.15 ^B	30	88.53 ^B
60	93.20 ^C	60	87.54 ^C
90	92.05 ^D	90	87.04 ^D
120	91.17 ^E	120	86.73 ^E
150	90.97 ^F	150	86.43 ^F
180	90.77 ^G	180	86.36 ^G

หมายเหตุ XX^X: ร้อยละการดูดซับไอร้ออน (II) ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 26 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอร้ออน (II) ไอออน
ทางสถิติโดยวิธี LSD

สาหร่ายหางกระรอก		สาหร่ายพวงกะโด	
ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน
100	94.08 ^A	100	88.46 ^A
200	93.35 ^B	200	86.98 ^B
300	91.34 ^C	300	86.00 ^C
400	88.34 ^D	400	85.47 ^D
500	86.90 ^E	500	85.23 ^E

หมายเหตุ XX^X: ร้อยละการดูดซับไอร้ออน (II) ไอออนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 27 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสารร่าย ที่ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน
ไอร้ออน (II) ไอออน 30 มิลลิกรัม/ลิตร ทางสถิติโดยวิธี LSD

สารร่ายหางกระรอก		สารร่ายพุงชะโด	
ปริมาณสารร่าย (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน	ปริมาณสารร่าย (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ไอร้ออน (II) ไอออน
0.5	84.80 ^A	0.5	84.57 ^A
0.75	90.43 ^B	0.75	85.03 ^B
1.0	95.07 ^C	1.0	89.77 ^C
1.5	95.63 ^D	1.5	90.23 ^D
2.0	96.33 ^E	2.0	91.37 ^E

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวรติมา สกุลงาม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 19 กันยายน 2527
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพหลพลพยุหเสนา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยมหิดล
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-