

การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้สารยาสีเขียวแกมน้ำเงิน (สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย)



นางสาวปารวีย์ ถนนมทรัพย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Removal of iron and nickel ions from industrial wastewater by using blue green algae
(*Oscillatoria sp.*)



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียใน โรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย)
โดย	นางสาวปารวีย์ ฅนอมทรัพย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขุภกร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นายปรีชา แสงธีระปิติกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. จันทนา ไพบูรณ์)

ปารวีร์ ฅนอมทรัพย์ : การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในโรงงาน
อุตสาหกรรมโดยใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย) (Removal of
iron and nickel ions from industrial wastewater by using blue green algae
(*Oscillatoria sp.*)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ฅฐพร โทณานนท์, 90 หน้า.

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย) ที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อ
เย็นของโรงงานอุตสาหกรรมถูกใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจาก
น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด
ไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายทั้งแบบสดและแบบแห้ง วัดความเข้มข้นของประจุโลหะใน
น้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง ICP-OES วิเคราะห์โครงสร้างภายในเซลล์ ลักษณะพื้นผิวและหมู่ฟังก์ชันบน
พื้นผิวด้วยเครื่อง TEM, SEM และ FTIR ตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณตัวดูดซับ ความ
เข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของโลหะแต่ละชนิดและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดโลหะด้วย
สาหร่ายแบบแห้งคือ 5, 1 กรัมต่อลิตร, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ร้อยละการ
กำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายที่แบบแห้งคือ 63.20 และ 8.47 ตามลำดับ สำหรับการกำจัดโลหะ
หนักด้วยสาหร่ายแบบสด เวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมงและความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของโลหะ
แต่ละชนิดคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายที่มีชีวิตคือ 99.83
และ 75.27 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5670280821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HEAVY METAL REMOVAL, INDUSTRIAL WASTEWATER, BLUE GREEN ALGAE, LIVING CELL, DEAD CELL

PARAWEE THANOMSUP: Removal of iron and nickel ions from industrial wastewater by using blue green algae (*Oscillatoria sp.*). ADVISOR: ASST. PROF. NATTAPORN TONANON, D.Eng., 90 pp.

The blue green algae (*Oscillatoria sp.*) that thrive in the cooling water system of the industrial factory was used as absorbent in the process of iron and nickel ions removal from synthetic and industrial wastewater in order to study the optimum conditions of iron and nickel ions removal by using algae both living and dead cells. The concentrations of metal ions were measured in the aqueous samples by using ICP-OES. For intracellular structure, surface morphology and surface functionality were analyzed by TEM, SEM and FTIR, respectively. The optimum pH, biosorbent dosage, initial concentration of each ion and contact time for metal removal process by dead cell are 5, 1 g/L, 30 mg/L and 1 hour, respectively. The percentages of iron and nickel ions removal by dead cell are 63.20 and 8.47, respectively. For living cell, the optimum contact time for metal removal process is 6 hours and the suitable initial concentration of each ion is 10 mg/L. The percentages of iron and nickel ions removal by living cell are 99.83 and 75.29, respectively.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ โทธมานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ นายปรีชา แสงธีระปิติกุล และอาจารย์ ดร. จันทนา ไพบุรณ์ ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนถึงคำปรึกษาที่มีประโยชน์ยิ่ง

ขอขอบพระคุณบริษัทสยามพริท จำกัด และบริษัทอุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณนายวสันต์ ถนอมทรัพย์ผู้เป็นบิดาและนางเกษราภรณ์ ถนอมทรัพย์ผู้เป็น มารดา ครอบครัวและผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆ เรื่อยมา จนทำให้สำเร็จการศึกษาครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	15
1.2 วัตถุประสงค์.....	16
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัย	19
2.1 โลหะหนัก (Heavy metals).....	19
2.1.1 นิกเกิล (Nickel).....	19
2.1.2 เหล็ก (Iron).....	20
2.1.3 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย.....	20
2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)	21
2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption).....	22
2.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption).....	22
2.2.3 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption).....	22
2.3 สาหร่าย (algae).....	22
2.3.1 ลักษณะของสาหร่ายที่แตกต่างจากแบคทีเรีย	23

2.3.2 ความแตกต่างของสาหร่ายกับพืชทั่วไป [3].....	24
2.3.3 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae).....	24
2.4 กลไกการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่าย	26
2.4.1 กระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)	29
2.4.2 กระบวนการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation).....	32
2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	39
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	39
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	49
4.1 การดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	52
4.1.1 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง	52
4.1.2 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ.....	54
4.1.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย	55
4.1.4 อิทธิพลของเวลาสัมผัส.....	57
4.1.5. การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสาหร่าย แบบแห้ง	58
4.2 การเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของสาหร่ายแห้งหลังการดูดซับโลหะหนัก	59
4.3 การดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบสด	63
4.3.1. อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง	63
4.3.2. อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์.....	64
4.3.3. อิทธิพลของเวลาสัมผัส.....	66
4.3.4 การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสาหร่าย แบบสด	68

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2. ข้อเสนอแนะ	73
รายการอ้างอิง	74
ภาคผนวก.....	81
สูตรการคำนวณ.....	81
ตารางแสดงผลการคำนวณ.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	90



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย	20
ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรียสังเคราะห์แสง ได้แก่ แบคทีเรียสีเขียว (Green bacteria) และแบคทีเรียสีม่วง (Purple bacteria)	23
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความแตกต่างระหว่างกระบวนการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation) และกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)	28
ตารางที่ 2.4 แสดงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์	34
ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงตำแหน่งพีกการดูดซับและหมู่ฟังก์ชันจากกราฟ FTIR	60
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงปริมาณคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายที่สภาวะต่างๆ	66
ตารางที่ ก.1 อิทธิของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	82
ตารางที่ ก.2 อิทธิของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	83
ตารางที่ ก.3 อิทธิของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	84
ตารางที่ ก.4 อิทธิของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	85
ตารางที่ ก.5 อิทธิของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	86
ตารางที่ ก.6 อิทธิของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบสด	87
ตารางที่ ก.7 อิทธิของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบสด	88
ตารางที่ ก.8 อิทธิของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบสด	89

ตารางที่ ก.9 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิลจากน้ำเสียโรงงาน ด้วยสาหร่ายแบบสด	89
ตารางที่ ก.1 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิลด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	82
ตารางที่ ก.2 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิลด้วยสาหร่าย แบบแห้ง.....	83
ตารางที่ ก.3 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิล ด้วย สาหร่ายแบบแห้ง.....	84
ตารางที่ ก.4 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิล จากน้ำเสีย สังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	85
ตารางที่ ก.5 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิล จากน้ำเสีย โรงงานด้วยสาหร่ายแบบแห้ง	86
ตารางที่ ก.6 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิลด้วยสาหร่ายแบบสด	87
ตารางที่ ก.7 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิลด้วยสาหร่าย แบบสด	88
ตารางที่ ก.8 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิล จากน้ำเสีย สังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบสด	89
ตารางที่ ก.9 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิเกิล จากน้ำเสีย โรงงานด้วยสาหร่ายแบบสด.....	89

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน	25
รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับด้วยชีวมวล	27
รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการจับไอออนของโลหะหนักในกระบวนการ ดูดซับทางชีวภาพ.....	31
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงกระบวนการที่ใช้ในการดูดซึมของจุลินทรีย์และการล้างพิษของโลหะ	33
รูปที่ 3.1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ใช้ในการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิล (ก) สาหร่ายที่เก็บมาจากโรงงาน สยามฟริท จำกัด (ข) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่แยกตะกอนออกแล้ว (ค) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงผ่านตะแกรกร่อนขนาด 0.85 มิลลิเมตร	40
รูปที่ 3.2 ลักษณะเครื่องทดสอบการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบสตรระบบน้ำวนและความคม อุณหภูมิ ขนาด 30x50x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง และ (ค) ด้านในของตัวถัง	44
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองของสาหร่ายแบบแห้ง	47
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองของสาหร่ายแบบสด	48
รูปที่ 4.1 สาหร่ายที่พบบริเวณระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามฟริท จำกัด (ก) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน พบบริเวณที่มีอุณหภูมิช่วง 35-48 องศาเซลเซียส (ข) สาหร่ายสีเขียวพบบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สายพันธุ์ ออสซิลลาทอเรีย ที่มาจากโรงงาน สยามฟริท จำกัด.....	50
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามฟริท จำกัด ภายใน 4 สัปดาห์	51

- รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลของความเป็นกรด-ต่างต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณสาหร่ายต่อน้ำเสียคือ 1 กรัมต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที52
- รูปที่ 4.5 ภาพแสดงลักษณะการตกตะกอนของโลหะหนัก (ก) เหล็กเริ่มตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ต่าง 6 (ข) นิกเกิลเริ่มตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ต่าง 10.....53
- รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ต่าง 5 ทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที54
- รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบผสมต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ค่าความเป็นกรด-ต่าง 5 ปริมาณตัวดูดซับคือ 1 กรัมต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที56
- รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ค่าความเป็นกรด-ต่าง 5 ปริมาณตัวดูดซับคือ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที57
- รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ปริมาณตัวดูดซับคือ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลคือ 10.47 และ 2.16 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที58
- รูปที่ 4.10 กราฟ FTIR แสดงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสาหร่ายแบบแห้งก่อน (สีแดง) และหลัง (สีน้ำเงิน) กระบวนการดูดซับเหล็กและนิกเกิล59
- รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของสาหร่าย (ก) ก่อน และ (ข) หลังกระบวนการดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิด 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 5 ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ 1 กรัมต่อลิตรและทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....62

- รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอิทธิพลของความเป็นกรด-ต่างต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและ
นิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบสด ความเข้มข้น
เริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ
สาหร่ายต่อน้ำเสียคือ 5 กรัม/น้ำหนักเปียกต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....64
- รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบโลหะ
ผสมต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนัก
ด้วยสาหร่ายแบบสด ค่าความเป็นกรด-ต่างคือ 5 ปริมาณสาหร่ายต่อน้ำเสียคือ 5
กรัม/น้ำหนักเปียกต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....65
- รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและ
ความสามารถในการจับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบสด ค่า
ความเป็นกรด-ต่างคือ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสม
คือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที.....67
- รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิล
และความสามารถในการจับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสาหร่าย
แบบสด ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลคือ 31.16 และ 2.56 มิลลิกรัมต่อ
ลิตร อัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที.....69
- รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย TEM แสดงลักษณะภายในเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน
(*Oscillatoria sp.*) (ก) ก่อนและ (ข) หลังกระบวนการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วย
สาหร่ายแบบสด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิด 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
ค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 5 เวลาในการทดลอง 6 ชั่วโมง.....70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนบริเวณใกล้เคียง เช่น มลภาวะทางเสียง มลภาวะทางอากาศ มลภาวะทางน้ำ และปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งโลหะหนักเป็นสารที่ไม่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพได้ แต่จะเกิดการสะสมและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักจะส่งผลต่อการทำงานของระบบต่างๆในร่างกาย เช่น ทำลายระบบประสาท ระบบหมุนเวียนเลือด ระบบหายใจและเป็นอันตรายต่ออวัยวะต่างๆในร่างกาย เช่น ตับ ไตและปอด ทั้งนี้ระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่ร่างกายได้รับ ดังนั้นเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจึงเป็นกระบวนการที่จำเป็นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งปัจจุบันมีหลายเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น การตกตะกอนเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) การใช้เมมเบรน (Membrane process) เป็นต้น แต่เทคโนโลยีเหล่านั้นมีข้อจำกัดคือ มีค่าใช้จ่ายสูง ใช้สารเคมีในปริมาณมาก และเหลือกากตะกอนหลังการบำบัดจำนวนมาก การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะนอกจากจะแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวได้แล้ว ยังเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [1]

ระบบน้ำหล่อเย็นในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากพบการเจริญเติบโตของสาหร่ายภายในระบบ เช่นเดียวกับระบบน้ำหล่อเย็นในโรงงานสยามพริท จำกัด และหากปล่อยไว้จะทำให้เกิดการบลูมของสาหร่าย (Algae bloom) ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก แหล่งน้ำมีธาตุอาหารสมบูรณ์จนสาหร่ายเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่มักจะเกิดในช่วงฤดูร้อน อุณหภูมิน้ำสูงกว่าปกติ สกุลของสาหร่ายที่ทำให้เกิดการบลูมส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งส่วนมากเป็นสายพันธุ์ที่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม [2] เนื่องจากผนังเซลล์ของสาหร่ายพันธุ์นี้มีชีท (Sheath) ที่หนากว่าปกติและโมเลกุลของโปรตีนภายในโปรโตพลาสซึมจับตัวกันแน่น จึงสามารถป้องกันออร์แกเนลล์ภายในเซลล์จากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภายนอกได้ สาหร่ายชนิดนี้จึงมีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง เช่น บริเวณน้ำพุร้อน และในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำๆ เช่น ขั้วโลกเหนือ ได้ [3] การบลูมของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะสร้างสารพิษซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ดื่มกินเข้าไป นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตา

หากเกิดการสัมผัสอีกด้วย ดังนั้นการนำสาหร่ายจากโรงงานมาใช้กำจัดน้ำเสีย นอกจากจะเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์แล้ว ยังเป็นการลดปัญหาจากการบวมของสาหร่ายดังกล่าวอีกด้วย

สาหร่ายเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งที่มีการนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก โดยศึกษาสายพันธุ์และสถานะที่เหมาะสม [4, 5] การบำบัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายมีทั้งการใช้สาหร่ายที่มีชีวิตหรือเรียกว่าสาหร่ายสด (Living cell) และไม่มีชีวิตหรือเรียกว่าสาหร่ายแห้ง (Dead cell) จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายแห้งให้ประสิทธิภาพสูงกว่าและใช้เวลาน้อยกว่าการใช้สาหร่ายมีสด [6] แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการบำบัดด้วยสาหร่ายแห้งนี้คือการแยกสาหร่ายออกจากน้ำหลังการบำบัด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (เหล็กและนิกเกิล) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด ด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานสยามพริท จำกัด เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการดูดซับของสาหร่ายทั้งแบบสด (Living cell) และแบบแห้ง (Dead cell)

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาหาสถานะที่เหมาะสม (Optimum conditions) ของการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลในห้องปฏิบัติการด้วยสาหร่ายแบบสด (Living cell) และแบบแห้ง (Dead cell)
- เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็น
- ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไอออนของเหล็กและนิกเกิลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียของสาหร่าย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนัก (Fe, Ni) ด้วยสาหร่ายแบบแห้ง (Dead cell)

- ศึกษาเวลาที่เหมาะสม (Optimum time) สำหรับการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายเพื่อดูปริมาณโลหะหนักที่หายไป

- ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (pH 3-7)
- ศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนัก (Fe, Ni) ในน้ำสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (1-100 mg/L)
- ศึกษาผลของปริมาณสาหร่ายที่ใช้เป็นตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (1-5 g dry wt./L)
- ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (Fe, Ni) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมของสาหร่าย

การศึกษากว้างที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนัก (Fe, Ni) ด้วยสาหร่าย จะทำการศึกษาด้วยกระบวนการแบบกะ (Batch process) โดยใช้สัดส่วนปริมาณสาหร่ายต่อปริมาณน้ำเสียเป็น 1 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อลิตร [7]

1.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายแบบสด (Living cell)

- ความคุมแสง 12:12 ชั่วโมง (แสง : มีด) [8]
- ศึกษาเวลาที่เหมาะสม (Optimum time) สำหรับการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่าย (48 ชั่วโมง) เพื่อดูปริมาณโลหะหนักที่หายไป
- ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (pH 1-7)
- ศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนัก (Fe, Ni) ในน้ำสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (1-100 mg/L)
- ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (Fe, Ni) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมของสาหร่าย

1.3.3 น้ำเสียและสาหร่ายที่ใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการกำจัดโลหะหนัก (Fe, Ni)

- น้ำเสียสังเคราะห์
- น้ำเสียที่ได้จากบริษัท อุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด
- สาหร่ายที่ใช้ศึกษาเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็นบริษัทสยามฟริท จำกัด

1.3.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์สาหร่ายและประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

- Transmission Electron Microscope (TEM) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสาหร่ายสด ก่อน-หลังการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการกำจัดโลหะหนัก
- Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของสาหร่ายแห้ง ก่อน-หลังการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการกำจัดโลหะหนัก
- Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์ของสาหร่าย
- Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP – OES) เพื่อคำนวณความเข้มข้นของโลหะหนักที่เปลี่ยนไประหว่างกระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่าย เพื่อนำไปใช้งานจริง
- เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
- เป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่สำหรับกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย
- ลดปัญหาและค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนที่ได้จากการกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัย

2.1 โลหะหนัก (Heavy metals)

โลหะหนักคือกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากโลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติได้ บางส่วนจึงตกตะกอนสะสมอยู่ในดินตะกอน แหล่งน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสายใยอาหารด้วย ความเป็นพิษของโลหะหนักก่อให้เกิดความเสียหายต่อร่างกายหลายประการแม้จะมีการสะสมในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งความเป็นพิษของโลหะหนักออกฤทธิ์ต่อร่างกายดังนี้

- โลหะหนักจะเข้าไปแย่งการทำงานของเอนไซม์ โดยจะเข้าไปแทนที่แร่ธาตุจำเพาะของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์สูญเสียการทำงานหรือหยุดทำงานไป
- เพิ่มการสร้างอนุมูลอิสระและลดระดับสารต้านอนุมูลอิสระที่ร่างกายสร้างขึ้น
- โลหะหนักเป็นพิษต่อผนังเซลล์ อาจทำให้เซลล์เปราะได้ เช่น สารตะกั่วทำลายเซลล์เม็ดเลือดแดง
- โลหะหนักยับยั้งการทำงานของ DNA และ RNA

นอกจากนี้โลหะหนักยังก่อให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะและระบบต่างๆในร่างกาย เช่น ระบบประสาท ระบบหายใจ และเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย [9]

2.1.1 นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลเป็นธาตุชนิดหนึ่ง ที่มีเลขอะตอม 50.94 มีลักษณะเป็นโลหะแข็งสีเงินวาว ความเป็นพิษของนิกเกิลก่อให้เกิดผื่นแพ้ นอกจากนี้สารประกอบของนิกเกิล ยังก่อให้เกิดมะเร็งปอด มะเร็งโพรงจมูกและไซนัส ได้ด้วย สารประกอบของนิกเกิลที่มีพิษมากที่สุดคือนิกเกิลคาร์บอนิล (Nickel carbonyl) มีฤทธิ์ทำให้ คลื่นไส้ อาเจียน เวียนศีรษะ ปวดศีรษะ และปอดบวมน้ำได้

นิกเกิลพบได้มากในอุตสาหกรรมการผลิต เหมืองยูเรเนียม สแตนเลสสตีล โลหะอัลลอยด์ แบตเตอรี่นิกเกิล วัสดุฉนวนไฟฟ้า เครื่องประดับ เซรามิก หมึก ส่วน Nickel carbonyl ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม พลาสติก และยาง ซึ่งน้ำเสียที่ใช้ในการบวนการต่างๆในโรงงาน

อุตสาหกรรมหลังผ่านการบำบัดต้องมีปริมาณนิเกิลไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามกฎหมายกำหนด [10]

2.1.2 เหล็ก (Iron)

เหล็กเป็นของแข็ง สีดำหรือเทา มีเลขอะตอม 55.84 ส่วนใหญ่มักพบเห็นในรูปออกไซด์ซ์ (Oxidized form) หรือ Iron (III) oxide ความถ่วงจำเพาะสูง (7.68) ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายน้ำ ติดไฟได้ถ้าอยู่ในลักษณะผงฝุ่น รวมทั้งระเบิดได้ในกรณีที่โดนความร้อนหรือสารเคมี

ความเป็นพิษของธาตุเหล็กที่เกิดจากการดูดซึมธาตุ เหล็กเข้าร่างกาย และการกระจายตัวของธาตุเหล็กในธรรมชาติ ในเด็กที่ทานยาบำรุงเลือดที่มีธาตุเหล็ก หรือวิตามินรวมต่างๆที่ผสมอยู่ในลูกอม อาจได้รับธาตุเหล็กในปริมาณมากจนเป็น อันตราย นอกจากนี้ยังพบเหล็กในน้ำดิบ ท่อเหล็ก และอุปกรณ์เครื่องครัว โดยอวัยวะเป้าหมายหลักที่เหล็กเข้าไปทำปฏิกิริยาก็คือ ตับ ไต และระบบหัวใจและหลอดเลือด ตามมาตรฐาน มอก. กำหนดให้ปริมาณเหล็กในน้ำที่ใช้บริโภคไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร [11]

2.1.3 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการชะล้างมักมีการปนเปื้อนสารต่างๆเกินกว่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด และหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยปราศจากการบำบัดก่อนจะส่งผลให้เกิดมลภาวะเป็นพิษ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีความจำเป็นมากสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งแสดงข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีต่างๆไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [1]

วิธี	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)	<ul style="list-style-type: none"> • สะดวก • ไม่แพง • สามารถกำจัดโลหะหนักได้มาก 	<ul style="list-style-type: none"> • มีปริมาณสลัดจ์มาก • มีปัญหาในการกำจัด
การกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทางเคมี (Chemical coagulation)	<ul style="list-style-type: none"> • รวมกากตะกอน 	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาสูง • ใช้สารเคมีจำนวนมาก

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

วิธี	ข้อดี	ข้อเสีย
แลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)	<ul style="list-style-type: none"> อัตราการเกิดของวัสดุสูง มีการเลือกโลหะ 	<ul style="list-style-type: none"> ราคาสูง กำจัดไอออนของโลหะได้น้อย
วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical methods)	<ul style="list-style-type: none"> มีการเลือกโลหะ ไม่ใช้สารเคมี ได้โลหะที่มีความบริสุทธิ์ 	<ul style="list-style-type: none"> ค่าใช้จ่ายสูง ต้องคำนึงถึง pH ของสารละลายเริ่มต้นและความหนาแน่นกระแส
กระบวนการเมมเบรนและUF (Membrane process and ultrafiltration)	<ul style="list-style-type: none"> ของเสียที่เป็นของแข็งน้อย ใช้สารเคมีน้อย ประสิทธิภาพสูง (>95% สำหรับโลหะชนิดเดียว) 	<ul style="list-style-type: none"> ต้นทุนและค่าใช้จ่ายสูง อัตราการไหลต่ำ ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเมื่อมีโลหะอื่นด้วยการดูดซับ (Adsorption)
การใช้ถ่านกัมมันต์ (Using activated carbon)	<ul style="list-style-type: none"> กำจัดโลหะได้จำนวนมาก ประสิทธิภาพสูง(>99%) 	<ul style="list-style-type: none"> ราคาถ่านกัมมันต์ ใช้ซ้ำไม่ได้ สมรรถนะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ
การใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Using natural zeolite)	<ul style="list-style-type: none"> กำจัดโลหะได้จำนวนมาก วัสดุที่ใช้ราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> ประสิทธิภาพต่ำ

2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับนี้เป็นปรากฏการณ์ของกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ [12]

2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เกิดจากโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีแรงดึงดูดระหว่างกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Force) และแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งเป็นแรงอ่อน ทำให้เกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย การดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) [12]

2.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เกิดเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน คือมีการสร้างพันธะเคมีบนผิวของตัวดูดซับโดยมีการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้มีค่าความร้อนสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องมีองค์ประกอบและสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นการดูดซับประเภทนี้จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) [12]

2.2.3 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

การดูดซับทางชีวภาพคือการกำจัดโลหะออกจากสารละลายโดยใช้วัสดุทางชีวภาพ และจากการศึกษาของ [13] ได้กล่าวว่ากลไกการดูดซับทางชีวภาพอาจประกอบด้วยหลายกลไก เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) คีเลชัน (Chelation) การตกตะกอน (Precipitation) เป็นต้น และจากรูปที่ 2.1 แสดงกลไกการกำจัดโลหะหนักภายในเซลล์ของพืชชั้นสูง ซึ่งจากการศึกษาของ Robert R. Brooks พบว่ามีพืชหลายชนิดที่มีประสิทธิภาพการสะสมโลหะภายในเซลล์สูง และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินก็เป็นหนึ่งในนั้น [14]

2.3 สาหร่าย (algae)

สาหร่าย (Algae) หมายถึง สิ่งมีชีวิตชั้นต่ำ มีทั้งสาหร่ายขนาดเล็กมาก (Microalgae) จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการส่องดูโครงสร้าง และสาหร่ายขนาดใหญ่ (Macroalgae) ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สาหร่ายเหล่านี้มีราก ลำต้น และใบรวมเรียกว่า ทัลลัส (Thallus) ส่วนใหญ่จะมีคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง จากข้อมูลตารางทางธรณีวิทยา (Geological time table) พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นสิ่งมีชีวิตพวกแรกที่เกิดขึ้นบนโลกนี้ ซึ่งเป็นระยะเวลามากกว่า 4,500 ล้านปี ส่วนสาหร่ายสีเขียวนั้นเกิดขึ้นเมื่อ 600 ล้านปีที่ผ่านมา และได้วิวัฒนาการไปเป็นพืชบก (Land plants) หลังจากนั้นวิวัฒนาการของสาหร่ายก็เกิดขึ้นอย่างมากมาย

ทั้งสาหร่ายสีแดง สาหร่ายสีน้ำตาล และสาหร่ายชนิดอื่นๆ จึงนับได้ว่าสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่เกิดก่อนพวกไบรโอไฟต์ (Bryophytes) เฟิร์น (Pteridophytes) สนและปรง (Gymnosperms) และพืชดอก (Angiosperms)

2.3.1 ลักษณะของสาหร่ายที่แตกต่างจากแบคทีเรีย

เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีจุดกำเนิดใกล้เคียงกับแบคทีเรียและมีลักษณะบางอย่างที่เหมือนกัน เป็นต้นว่ามีคุณสมบัติเป็นโพรแคริโอตเหมือนกัน แบคทีเรียบางชนิดสามารถสังเคราะห์แสง (Photosynthetic bacteria) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายสาหร่าย แต่ก็มีลักษณะหลายอย่างที่แตกต่างกันไป Lechevalier และ Pramer ได้กล่าวถึงความแตกต่างระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรียสังเคราะห์แสงไว้ดังตารางที่ 2.2 [3]

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างสาหร่ายและแบคทีเรียสังเคราะห์แสง ได้แก่ แบคทีเรียสีเขียว (Green bacteria) และแบคทีเรียสีม่วง (Purple bacteria)

คุณสมบัติ	สาหร่าย	แบคทีเรียสีเขียว	แบคทีเรียสีม่วง
สารที่ทำให้เกิดการลดออกซิเจนหรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนการสังเคราะห์แสง	น้ำ	ไฮโดรเจนซัลไฟด์หรืออินทรีย์สารอื่นที่อยู่ในสภาพลดออกซิเจน	ไฮโดรเจนซัลไฟด์หรืออินทรีย์สาร หรืออินทรีย์สารอื่นที่อยู่ในสภาพลดออกซิเจน
เกิดออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์แสง	มี	ไม่มี	ไม่มี
แหล่งที่จะได้คาร์บอน (Carbon source)	คาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์หรืออินทรีย์สารอื่น
ประเภทของการหายใจ	ใช้ออกซิเจน (aerobic respiration)	ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration)	ไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเดียว หรือใช้และไม่ใช้ออกซิเจน (facultative respiration)

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

คุณสมบัติ	สาหร่าย	แบคทีเรียสีเขียว	แบคทีเรียสีม่วง
ชนิดของคลอโรฟิลล์	a b c และ d	คลอโรเบียม คลอโรฟิลล์ (chlorobium chlorophyll) a (จำนวน น้อย) c d และ e	แบคทีเรียคลอโรฟิลล์ (bacterio chlorophyll) a b c d และ e

2.3.2 ความแตกต่างของสาหร่ายกับพืชทั่วไป [3]

สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำเพราะมีคลอโรฟิลล์ จึงสามารถสร้างอาหารเองได้ แต่มีความแตกต่างจากพืชในดิวิชันอื่นๆ ดังนี้

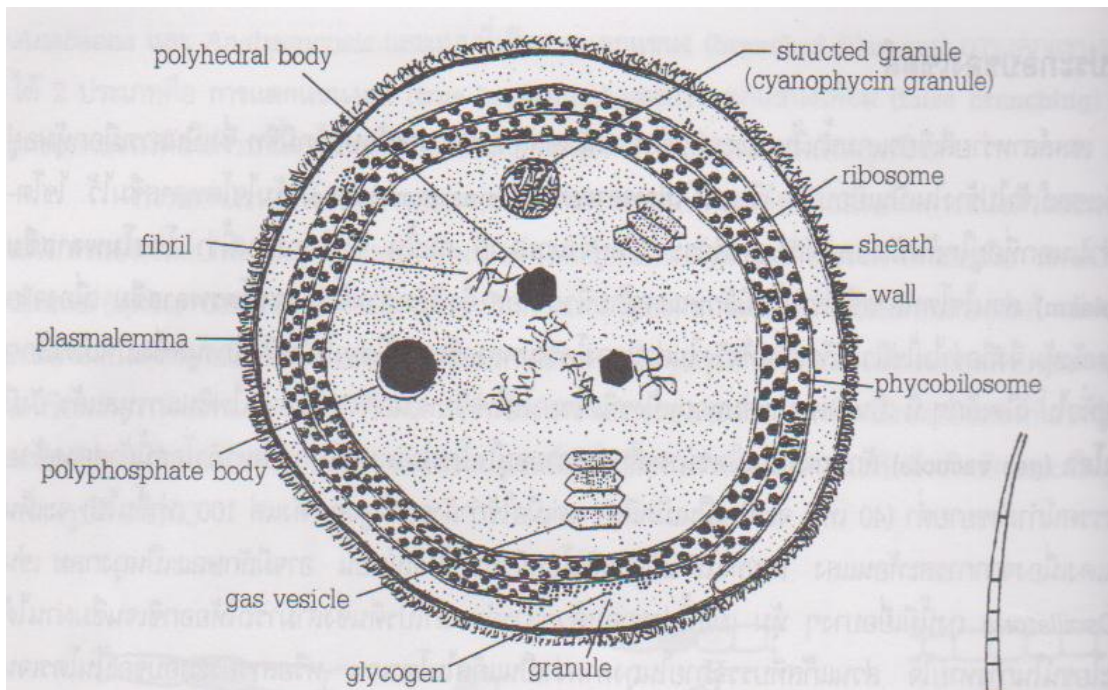
- สาหร่ายอาจประกอบไปด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียวหรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Colony) ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ
- สาหร่ายไม่มีระบบท่อลำเลียง (Vascular system) แต่มีทลัสบางชนิดจะมีเซลล์คล้ายกับเนื้อเยื่อโฟลเอ็ม (Phloem) และเนื้อเยื่อเมอริสเต็ม (Meristematic tissue) แต่ยังไม่มีไซเลม (Xylem)
- เซลล์สืบพันธุ์ของสาหร่ายประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว
- ไซโกต (Zygote) ของสาหร่ายไม่มีการพัฒนาเป็นเอ็มบริโอ (Embryo)

2.3.3 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae)

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) หรือเรียกอีกชื่อว่าไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) ถูกจัดไว้ใน Class Schizophyceae Division Schizomycophyta ซึ่งเป็นกลุ่มเดียวกับแบคทีเรียทั่วไป เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้มีโครงสร้างของนิวเคลียสคล้ายกับนิวเคลียสของแบคทีเรีย บางชนิดมีคุณสมบัติตรึงไนโตรเจนจากอากาศและมีคุณสมบัติทางชีวเคมีเช่นเดียวกับแบคทีเรีย แต่เนื่องจากสาหร่ายมีคลอโรฟิลล์เอและมีการปล่อยออกซิเจนจากสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการสังเคราะห์แสง นักวิชาการด้านสาหร่ายจึงจัดกลุ่มของสาหร่ายแยกออกจากกลุ่มของแบคทีเรีย [3]

ในบรรดาสสิ่งมีชีวิตที่พบคลอโรฟิลล์เอ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินถูกพบว่าเป็นสิ่งมีชีวิตที่โบราณที่สุด ละเป็นกลุ่มสาหร่ายที่มีจำนวนชนิดมากที่สุด สามารถพบสาหร่ายพวกนี้ได้ทุกที่แม้แต่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมาก เช่น น้ำพุร้อน หรือที่มีอุณหภูมิต่ำมาก เช่น ขั้วโลก เนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายชนิดนี้มีเมือก (Gelatinous sheath) หุ้ม จึงสามารถเก็บความชื้นไว้ในเซลล์และสามารถเป็นฉนวนกัน

ความร้อนและความเย็นให้กับเซลล์ได้ อีกทั้งโมเลกุลโปรตีนภายในยังมีการจับตัวกันแน่น จึงเป็นสาเหตุช่วยให้เซลล์มีชีวิตอยู่ได้นาน



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน [15]

2.3.3.1 ส่วนประกอบของเซลล์

ผนังเซลล์

Prescott [16] อ้างไว้ว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีผนังเซลล์ 3 ชั้น ชั้นในเป็นชั้นที่บางประกอบด้วยเซลล์โลส ชั้นกลางเป็นสารพวกเพคติน และชั้นนอกสุดเป็นสารเมือกเจลาติน ซึ่งเป็นชั้นที่เรียกว่าพลอกหุ้มหรือซีท ซีทที่หุ้มเซลล์ของสาหร่ายเหล่านี้บางชนิดก็บาง บางชนิดก็หนา บางชนิดซีทนี้อาจมีสารพวกเฮมิเซลล์ูโลสปนอยู่กับพวกเพคตินก็ได้ อาจใสไม่มีสีหรือมีสีเหลือง น้ำตาล แดง ม่วง และน้ำเงิน เนื่องจากมีรงควัตถุต่างๆปนอยู่กับสารเมือกในซีทนี้

ไซโตพลาสซึม

ไซโตพลาสซึมของสาหร่ายชนิดนี้จะอยู่ถัดจากผนังเซลล์เข้าไปข้างใน มีเยื่อพลาสมาเมมเบรน (Plasma membrane) หุ้มไว้ ซึ่งแตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่น ไซโตพลาสซึมยังแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือบริเวณส่วนในและบริเวณส่วนนอก ไซโตพลาสซึมส่วนในไม่มีรงควัตถุจึงมีสีใสเรียกว่า เซนโตรพลาสซึม (Centroplasm) ส่วนบริเวณรอบนอกเป็นบริเวณที่มีรงควัตถุสะสมอยู่เรียกว่า โครโมพลาสซึม (Chromoplasm) การแบ่งเขตของทั้ง 2 บริเวณนี้ไม่แน่นอนอาจมีการเหลื่อมล้ำกัน

บริเวณโครโมพลาสซึมจะมีโครงสร้างที่เป็นเม็ดเล็กๆ กระจายทั่วไปเรียกว่าไซยาโนไฟซิน แกรนูล (Cyanophycin granule) เป็นพวกแป้งชนิดหนึ่ง ซึ่งทำปฏิกิริยากับไอโอดีน นอกจากนี้ยังมี ไกลโคเจนแกรนูล (Glycogen granule) และหยดน้ำมันเล็กๆ (Lipid globule) กระจายอยู่ทั่วไป

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินไม่มีนิวเคลียสชัดเจนเหมือนสาหร่ายอื่น แต่มีสารทำหน้าที่คล้าย นิวเคลียสอยู่ภายในเซนโทรพลาสซึม เพียงแต่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสเท่านั้น สารที่ทำหน้าที่คล้าย นิวเคลียสนี้คือ DNA (Deoxyribonucleic acid) ซึ่งอาจจะรวมตัวกันเป็นร่างแหหลวมๆ หรือเป็น ท่อนสั้นๆ หรืออาจจะจับตัวกันหนาแน่นมากมีรูปร่างต่างๆก็ได้

แวกิวโอล

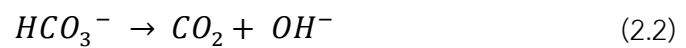
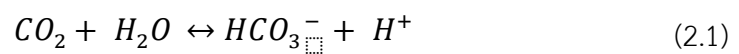
ไม่พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีแวกิวโอลขนาดใหญ่เหมือนสาหร่ายชนิดอื่นๆ แต่บางชนิด อาจจะมีแก๊สแวกิวโอล (Gas vacuole) หรือซูโดแวกิวโอล (Pseudovacule) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด เล็กๆกระจายอยู่ทั่วไป โดยทั่วไปแก๊สแวกิวโอลมีสี่เหลี่ยม แต่ถ้าดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำจะ เห็นเป็นสีดำ หรืออาจพบว่ามีสีแดงเนื่องจากการหักเหของแสง แก๊สที่อยู่ในแวกิวโอลนี้ส่วนใหญ่จะ เป็นไนโตรเจนหรือสารประกอบไนโตรเจน มีออกซิเจนเป็นส่วนน้อย

แก๊สแวกิวโอลนี้ช่วยในการลอยตัวของสาหร่าย โดยครั้งแรกสาหร่ายจะจมอยู่ใต้พื้นน้ำ ต่อมา เมื่อมีการสร้างแก๊สแวกิวโอลก็จะลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำ ถ้าเกิดกับสาหร่ายจำนวนมากอาจ เกิดปรากฏการณ์วอเตอร์บลูมขึ้น โดยทั่วไปแก๊สแวกิวโอลจะพบในสาหร่ายพวกที่เป็นแพลงตอนพืช [3]

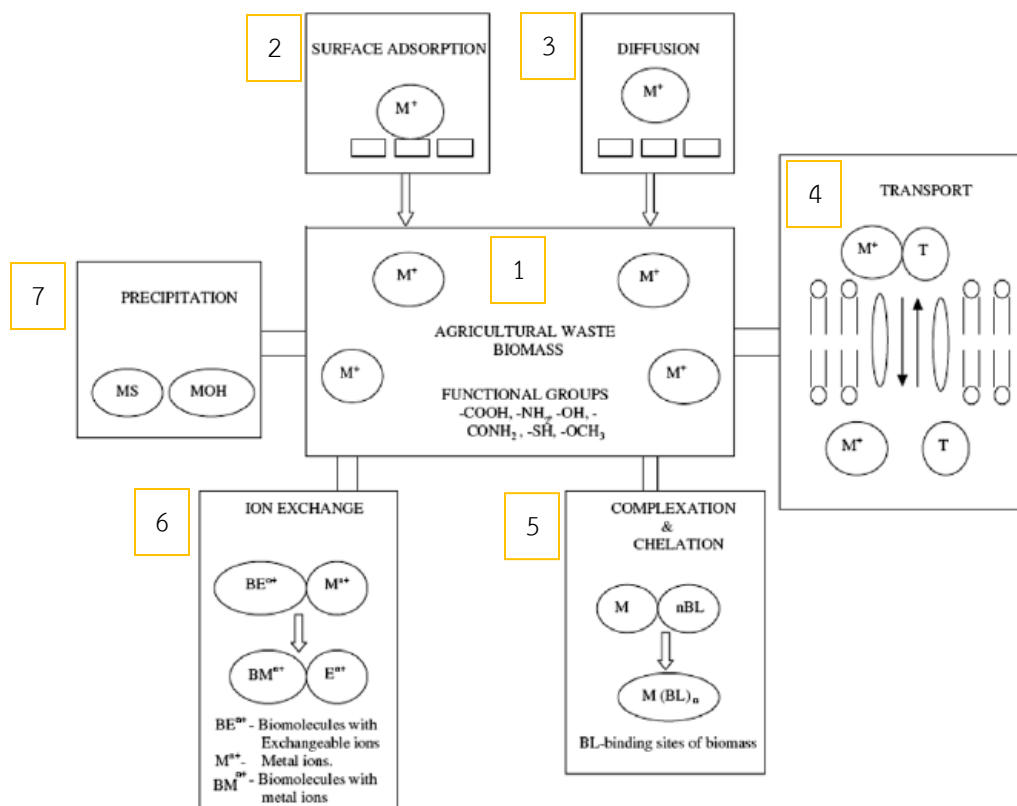
2.4 กลไกการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่าย

กลไกการกำจัดโลหะหนักของสาหร่ายประกอบด้วย 2 กลไกหลัก คือ กระบวนการดูดซับไม่ ขึ้นกับกระบวนการเผาผลาญของเซลล์ (Metabolism-independent biosorption) ซึ่งกระบวนการ นี้ส่วนมากจะเกิดขึ้นที่ผิวของเซลล์ และอีกกระบวนการหนึ่งคือกระบวนการสะสมทางชีวภาพโดย อาศัยกระบวนการเผาผลาญของเซลล์ (Metabolism-dependent bioaccumulation) ซึ่งทั้งสอง กระบวนการดังกล่าวยังประกอบด้วยหลายกระบวนการย่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยรูปหมายเลข 1 แสดงถึงพื้นผิวของสาหร่ายที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆซึ่งแสดงประจุลบ หมายเลข 2 และ 3 เป็นกลไกการดูดซับโลหะหนักที่เกิดบนพื้นผิวของสาหร่าย แต่ไม่เกี่ยวเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันบนผิว ของสาหร่าย โดยกลไกหมายเลข 2 เป็นกลไกการดูดซับบนพื้นผิวของสาหร่าย อาจขึ้นกับรูพรุนบน พื้นผิวสาหร่าย กลไกหมายเลข 3 เป็นกลไกการแพร่ของไอออนของโลหะไปสู่พื้นผิวของสาหร่ายซึ่ง เกี่ยวข้องกับแรงขับ (Driving force) ส่วนกลไกหมายเลข 4-7 เป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันบน ผิวของสาหร่าย โดยกลไกที่ 4 เป็นการขนส่งไอออนของโลหะหนักเข้าสู่ภายในเซลล์ของสาหร่าย โดย

ผ่านผนังเซลล์ กลไกหมายเลข 5 เป็นการตกตะกอนของโลหะหนักบนพื้นผิวของสาหร่าย โดยไอออนบวกของโลหะหนักจับกับไอออนลบของหมู่ฟังก์ชันและตกตะกอนบนพื้นผิวของสาหร่าย กลไกหมายเลข 6 เป็นกลไกที่เกิดบริเวณเมือกที่อยู่ชั้นนอกสุดของเซลล์สาหร่าย ซึ่งจะมีการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไอออนของแคลเซียมที่อยู่ภายในโครงสร้าง มีผลการศึกษาพบการปล่อยแคลเซียมระหว่างการจับแคดเมียมบนเอลจินเตของสาหร่าย เกิดขึ้นด้วยอัตราส่วน 1:1 ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกลไกหลักของการดูดซับแคดเมียม [17] กลไกหมายเลข 7 เกิดบริเวณขอบด้านในของผนังเซลล์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



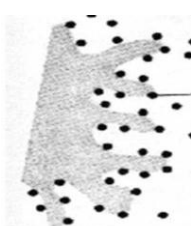
ไฮดรอกซิลไอออนในสมการที่ 2.2 จะจับกับอนุภาคของโลหะหนักและตกตะกอนบริเวณขอบด้านในของผนังเซลล์



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับด้วยชีวมวล [13]

โดยปกติการกำจัดโลหะโดยใช้เซลล์สาหร่ายที่มีชีวิต (living cell) จะเกี่ยวข้องกับทั้งสองกระบวนการดังกล่าว แต่สำหรับการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายที่ตายแล้วนั้น กระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) คือกระบวนการหลัก ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของสาหร่ายเท่านั้น [17]

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความแตกต่างระหว่างกระบวนการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation) และกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) [18, 19]

กระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)	กระบวนการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation)
<ul style="list-style-type: none"> เกิดขึ้นเองได้ (Passive process) ชีวมวลไม่มีชีวิต เกิดกระบวนการ Adsorption 	<ul style="list-style-type: none"> กระบวนการต้องใช้พลังงาน (Active process) ชีวมวลมีชีวิต เกิดกระบวนการ Absorption 
<ul style="list-style-type: none"> กระบวนการผันกลับได้ ไม่ต้องการสารอาหาร กระบวนการ 1 ขั้นตอน อัตราการเกิดเร็ว ไม่ควบคุมโดยกระบวนการ Metabolism ไม่มีอันตรายของผลกระทบจากพิษ ความเข้มข้นสมดุลของไอออนของโลหะระดับกลาง 	<ul style="list-style-type: none"> กระบวนการผันกลับได้บางส่วน ต้องการสารอาหาร กระบวนการ 2 ขั้นตอน อัตราการเกิดช้า ควบคุมโดยกระบวนการ Metabolism มีอันตรายของผลกระทบจากพิษเนื่องจากการปนเปื้อน ความเข้มข้นสมดุลของไอออนของโลหะระดับต่ำมาก

Chojnacka. (2009) [18] ได้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกระบวนการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation) และกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) ไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เขาได้อธิบายว่าในขั้นตอนแรกของการสะสมโลหะหนักที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายนั้น มีอัตราการเกิดเร็ว (Rapid phase) โดยอาศัยหลักการปฏิกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนผิวกับไอออนบวกของโลหะเป็นกลไกหลัก ส่วนขั้นตอนของการสะสมโลหะหนักในเซลล์เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นช้า (Slow phase) และอาศัยการเผาผลาญภายในเซลล์เป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hu et al. (1996) [20] ที่อธิบายการดูดซับ Cd และ Cu ด้วยสาหร่าย (*G. tenuistipitata*) ไว้ว่ากลไกการดูดซับเกิดโดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของผนังเซลล์กับไอออนของโลหะหนัก และหลังจากที่ผนังเซลล์อิ่มตัวด้วยโลหะหนักแล้ว การสะสมโลหะหนักภายในเซลล์จะเริ่มขึ้นโดยกระบวนการเผาผลาญของเซลล์

2.4.1 กระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

กระบวนการดูดซับทางชีวภาพเป็นหนึ่งในกระบวนการหลักสำหรับกระบวนการจับไอออนของโลหะหนักด้วยสาหร่าย ซึ่งกลไกของกระบวนการนี้ประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิว (Surface complexation) กระบวนการรีดอกซ์ (Redox process) และการตกตะกอน (Precipitation) ส่วนมากการจับโลหะหนักบนผิวชีวมวลเป็นผลจากหลายกลไกรวมกันและไม่ขึ้นกับกระบวนการเผาผลาญภายในเซลล์ จึงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเร็ว [17, 21]

ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) เป็นกลไกแรกของกระบวนการดูดซับทางชีวมวล โดยไอออนบวกของโลหะหนักจะถูกจับโดยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและถูกดูดซับเพิ่มเติมผ่านแรงผลักดันอื่นๆ (Driving forces) ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่างปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากคุณสมบัติทางประจุของโลหะแต่ละชนิดและผิวของเซลล์จะแตกต่างกันที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน [17, 22, 23] (รายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.4.1.1.) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนเข้ามาเกี่ยวข้องระหว่างกระบวนการ ถือเป็นปรากฏการณ์ที่โดดเด่นอย่างยิ่งบนผิวของสาหร่าย

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิว (Surface complexation) เป็นแรงผลักดันอย่างหนึ่งสำหรับกระบวนการดูดซับโลหะหนัก ผนังเซลล์คือที่แรกที่เกิดการดูดซับโลหะหนัก องค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ประกอบด้วย แปปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan), พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) และไขมัน (Lipid) ซึ่งเต็มไปด้วยลิแกนด์ที่จับโลหะ (เช่น $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{HPO}_4^{2-}$, SO_4^{2-} , $-\text{RCOO}^-$, $\text{R}_2\text{OSO}^{3-}$, $-\text{NH}_2$ และ $-\text{SH}$) ท่ามกลางหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้หมู่เอมีนมีประสิทธิภาพสูง

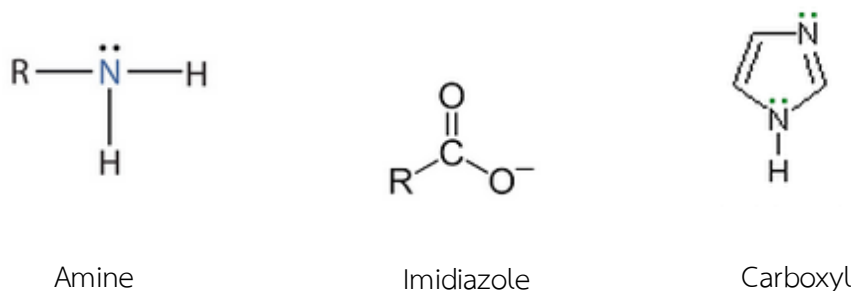
ในขณะที่มันจับกับไอออนลบของโลหะผ่านการทำงานร่วมกันระหว่างปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิตประจุบวก และชนิดของโลหะที่ผ่านพื้นผิวเชิงซ้อน [17]

โดยปกติการดูดซับด้วยกระบวนการนี้จะถูกอธิบายด้วย 2 โมเดลหลัก คือ โมเดลของแลงเมียร์ (Langmuir) และเฟรนด์ลิช (Freundlich) แต่โมเดลเหล่านี้จะต้องอยู่ภายใต้สมมติฐาน เช่นโมเดลของแลงเมียร์มีสมมติฐานดังนี้

- พื้นผิวดูดซับประกอบด้วยตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption sites)
- ตัวดูดซับทำปฏิกิริยาในตำแหน่ง (Site) เท่านั้น ไม่มีที่อื่น
- ต้องเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer)
- ในการดูดซับพลังงานของตำแหน่ง (Site) ทั้งหมดเหมือนกันและเป็นอิสระต่อกัน

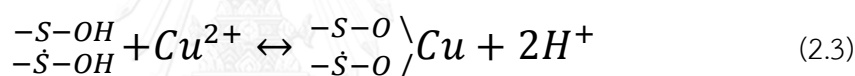
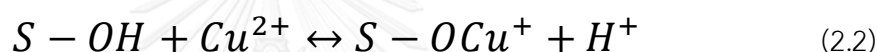
ซึ่งในกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงไม่ควรตั้งสมมติว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว เพราะเป็นไปได้ที่มีกลไกอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ค่าคงที่การจับโลหะที่ได้จากโมเดลต่างๆอาจมีความถูกต้องสำหรับเงื่อนไขที่ระบุและอาจใช้เพื่อประเมินขอบเขตความสัมพันธ์ของการจับโลหะกับผิวเซลล์ ทุกโมเดลถูกใช้อธิบายการดูดซับของโลหะเดี่ยวด้วยสหาย มีบางงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับมากกว่า 1 โลหะ ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่แสดงผลเกี่ยวกับเรื่องนี้อย่างเรียบง่าย และไม่มีโมเดลใดประเมินการปฏิบัติจริงของระบบชีวมวลหรือเปรียบเทียบความแตกต่างของผลได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Flouty et al. (2015) ที่ศึกษาอิทธิพลของทองแดงและตะกั่วต่อการดูดซับนิกเกิล และพบว่ากระบวนการดูดซับโดยมีประจุชนิดที่สองไม่สามารถทำนายได้ด้วยโมเดลสมดุล (Equilibrium model) [24]

กลไกการดูดซับโลหะหนักมักขึ้นอยู่กับกระบวนการจับโลหะหนักที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบของผนังเซลล์สหาย ผนังเซลล์สหายสามารถดูดซับแบบผันกลับได้ ซึ่งหน้าที่คล้ายกับการแลกเปลี่ยนประจุเรซิน ดังนั้นกลไกการดูดซับสามารถพิจารณาให้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของผนังเซลล์ โครงสร้างของผนังเซลล์ และองค์ประกอบทางเคมีของสายพันธุ์สหาย โดยมากจะไม่ลงรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบทางเคมีของสายพันธุ์ของสหาย องค์ประกอบทั่วไปของผนังเซลล์เป็นเซลลูโลสและสามารถสร้างโพลีแซกคาไรด์ต่อไป โดยโพลีแซกคาไรด์ที่ถูกสร้างขึ้นจะประกอบไปด้วยโปรตีนซึ่งให้ตำแหน่งการจับที่เป็นกรด เช่น หมูอะมิโน เอมีน ไฮดรอกซิล อิมิดิโอะล ฟอสเฟส และซัลเฟส (Amino, amine, hydroxyl, imidazole, phosphate and sulphate group) โปรตีนในผนังเซลล์จะให้หมู่ฟังก์ชันสำหรับการจับโลหะดังแสดงในรูปที่ 2.2 [6]



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการจับไอออนของโลหะหนักในกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ

ซึ่งลักษณะการเกาะของโลหะหนักบนพื้นผิวสำหรับรายแบบแห้งแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 และ 2.2 [25] โดย S แทนตำแหน่งบนพื้นผิวสำหรับราย



2.4.1.1 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

ความสามารถในการจับโลหะหนักของผนังเซลล์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของผนังเซลล์ ผนังเซลล์ของสาหร่ายโดยทั่วไปมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Peptidoglycan, Teichurenic acid, Teichoic acid, Polysaccharides และ Roteins [26] ซึ่งส่วนมากจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันหลัก 3 หมู่ คือ Carboxylic, Hydroxyl และ Phosphate [27, 28] และปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการจับโลหะหนักของผนังเซลล์ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จากผลการศึกษาของ Anirudhan และ Sreekumari [29] พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจนถึงค่าค่าหนึ่ง เนื่องจากค่า pH มีผลต่อประจุบนผิวหน้าของตัวดูดซับ ชีวมวลจะมีค่า pH ที่ทำให้ประจุบนผิวหน้ามีค่าใกล้เคียงศูนย์ เรียกค่านี้ว่า The point of zero charge (pH_{pzc}) ซึ่งถ้า $pH < pH_{pzc}$ จะทำให้ผิวของชีวมวลมีประจุเป็นบวก ส่งผลให้ดูดซับไอออนบวกของโลหะหนักไม่ดี แต่ถ้า $pH > pH_{pzc}$ จะทำให้ผิวของชีวมวลมีประจุเป็นลบ ส่งผลให้ดูดซับไอออนบวกของโลหะหนักได้ดีขึ้น จนถึงจุด Optimum ซึ่งจากผลการทดลองของ Anirudhan และ Sreekumari นี้ pH_{pzc} มีค่าเท่ากับ 5.2

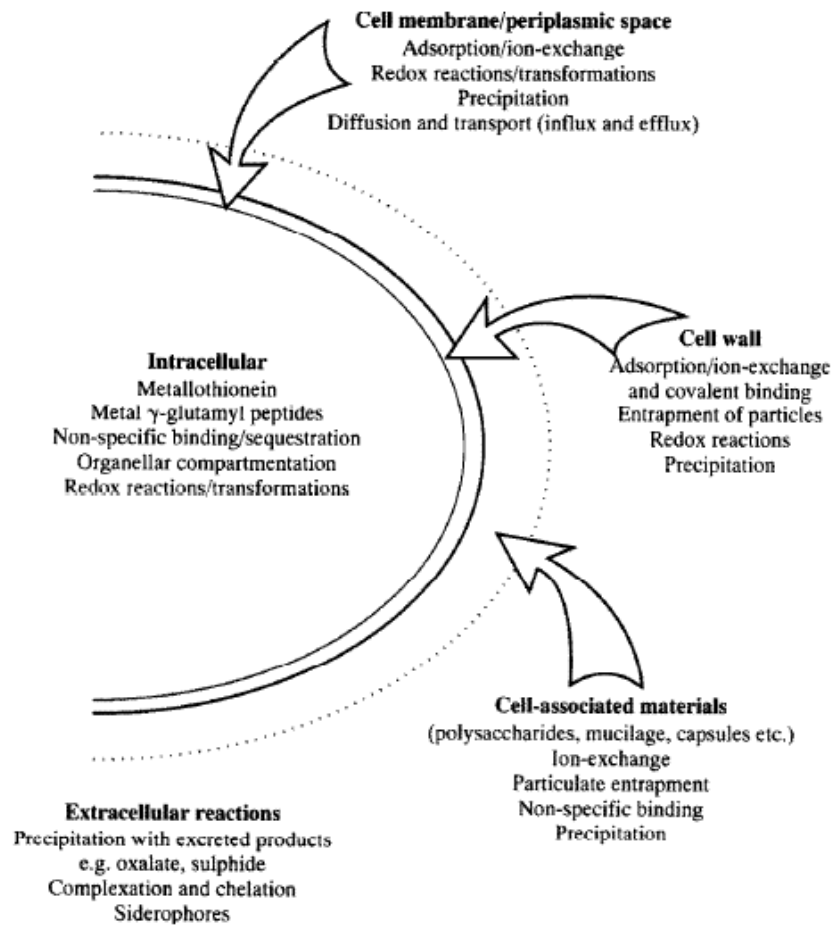
การดูดซับที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น เนื่องจากเป็นการลดการแข่งขันของโปรตอนในระบบกับไอออนบวกของโลหะหนักสำหรับหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำๆ ความเข้มข้นของโปรตอนจะเพิ่มขึ้นบนผิวของชีวมวล ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการเข้าถึงผิวชีวมวลของไอออนบวกของโลหะหนัก แต่ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโปรตอนจะลดลงและผิวของชีวมวลจะมีประจุเป็นลบ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น [7]

2.4.2 กระบวนการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation)

กระบวนการสะสมทางชีวภาพเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้อธิบายกลไกการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่าย ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเผาผลาญภายในเซลล์และการเจริญเติบโตของเซลล์จึงใช้เวลานานกว่ากระบวนการดูดซับทางชีวภาพซึ่งเกิดเฉพาะที่ผิวภายนอกเซลล์เท่านั้น [30]

เมื่อโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ผ่านทางไอออน เซลล์จะเปิดใช้ระบบล้างพิษบางส่วนโดยการตรึงหรือการไหล (Immobilization or efflux) ไอออนของโลหะสามารถตรึงโดยออกแกนเนล เช่น แวกคิวโอ หรือผูกไว้กับลิแกนด์ภายในเซลล์ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide), กลูตาไธโอน (Glutathione) และ เมททาลโลไทโอนิน (Metallothionein, MT) นอกจากนี้ทางชีวภาพ เซลล์ยังสามารถเปลี่ยนโลหะหนักเป็นโลหะชนิดต่างๆที่มีความเป็นพิษต่ำ โดยกระบวนการเมทิลเลชัน (Methylation) รีดักชัน (Reduction) หรือการตกตะกอน (Precipitation) โลหะบางชนิดอาจมีการเคลื่อนย้ายไปอยู่นอกเซลล์โดย metal-efflux system [17]

สิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์สามารถส่งผ่านโลหะและธาตุกึ่งโลหะได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) รีดักชัน (Reduction) เมทิลเลชัน (Methylation) และดีเอคิลเลชัน (Dealkylation) [31] ตามธรรมชาติของแบคทีเรียที่ทน Hg^{2+} จะสามารถรีดิวซ์ Hg^{2+} ให้เป็น Hg^0 ด้วยเอนไซม์เมอร์คิวริก รีดักเตส (Mercuric reductase) ซึ่งอัตราการระเหยของ Hg^0 จากน้ำเสียที่ปนเปื้อนคือ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดโลหะหนัก [32] มีแบคทีเรีย สาหร่าย เชื้อรา และยีสหลายชนิดที่สามารถรีดิวไอออนโลหะเปลี่ยนเป็นโลหะที่มีประจุเป็นศูนย์ [33] ดังนั้นการส่งผ่านโลหะของจุลินทรีย์ย่อมมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการลดความเป็นพิษของโลหะหนักและการบำบัดน้ำเสีย [34, 35]



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการที่ใช้ในการดูดซึมของจุลินทรีย์และการล้างพิษของโลหะ [36]

จากแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.3 ชี้ให้เห็นถึงกระบวนการที่ใช้อธิบายกลไกการกำจัดโลหะหนักที่มีความเป็นไปได้ ซึ่งบางกระบวนการโดยเฉพาะเอนไซม์และปฏิกิริยารีดอกซ์มีความไม่แน่นอนและตำแหน่งที่แสดงในแผนภาพเป็นเพียงตำแหน่งสมมติ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ อาจแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์และสิ่งแวดล้อม

การสะสมของโลหะหนักจากสิ่งมีชีวิตหรือเซลล์ชีวภาพถือเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรด้วยกัน เช่น คุณสมบัติทางเคมีของโลหะ ชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนผิวเซลล์ ความหนาแน่น การกระจายและศักยภาพของเซลล์ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับปัจจัยแวดล้อมภายนอก เช่น ความเป็นกรดของการเกิดปฏิกิริยาเวลาสัมผัส อุณหภูมิ การแข่งขันจากอยู่ร่วมกันของสายพันธุ์ และสภาพแวดล้อมของการเจริญเติบโตของสาหร่าย หากมีความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับปัจจัยที่สำคัญเหล่านี้ อาจช่วยเพิ่มความสะดวกในขั้นตอนการดูดซับและการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.4 ตารางการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียด้วยวัสดุต่างๆ

ตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
Graphene Nanocomposite		[37]
- GNS/ δ - MnO ₂	770.80	
- MnO ₂	471.93	
bagasse fly ash (a sugar industry waste)	1.70	[38]
Root of <i>Calotropis procera</i>	15.75	[39]
Bran of <i>Triticum aestivum</i>	12	[1]
Cow bon charcoal	32.54	[40]
Water hyacinth	0.097	[41]

ตารางที่ 2.5 ตารางการกำจัดเหล็กจากน้ำเสียด้วยวัสดุต่างๆ

ตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	อ้างอิง
Resin Porolite S930	55	[42]
Cow bon charcoal	31.43	[40]
<i>Rhizopus arrhizus</i>	612	[43]
<i>Bacillus sphaericus</i> -loaded Diaion SP-850 resin	9.2	[44]
<i>Streptomyces rimosus</i> (bacterial dead)	122	[45]
<i>Typha domingensis</i> leaf powder	2.11	[46]

ตารางที่ 2.6 การกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสายพันธุ์ต่างๆ

สายพันธุ์	โลหะ	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	อ้างอิง
<i>Spirulina</i>	Cr	31 for biosorption 101 for bioaccumulation	- 5 นาที, 30 ชั่วโมง - ตัวดูดซับ 0.25 g/L - ความเข้มข้นเริ่มต้น < 18 mg/L	[47]
<i>Spirulina</i>	Cr	10.7	- 30 นาที, มีการปรับ พื้นผิว	[48]
	Cd	1.77	- ตัวดูดซับ 1 g/L	
	Cu	6.17	- pH 7, 150 rpm	
<i>Calothrix parietina</i>	Hg	15.60-26.86	- 30 นาที	[49]
	Cd	61.68-109.57		
	Pb	31.48-126.66		
<i>Oscillatoria laete- virens</i>	Ni	84.73	- 60 นาที	[50]
	Cr	103.09	- pH 5 - 150 rpm	
<i>Spirulina platensis</i>	Ni	73.64	- 6 ชั่วโมง - pH 5 - ตัวดูดซับ 1 g/L	[51]

ตารางที่ 2.7 การกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายสายพันธุ์อื่นๆ

สถานะในการทดลอง	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	หมายเหตุ	อ้างอิง
<ul style="list-style-type: none"> - ทดสอบระบบแบบกะ (Batch process) - ปริมาณสาหร่าย : 1 กรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร - เวลาที่เข้าสู่สมดุล : 2 ชั่วโมง 	Cd : 108.21 Pd : 211.34 Cu : 105.49	<ul style="list-style-type: none"> - สาหร่ายสีน้ำตาลมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสาหร่ายสีเขียวและสาหร่ายสีแดง เนื่องจากผนังเซลล์มี Alginate (มีหมู่คาร์บอกซิลอยู่มาก) และ Fucoidan (มีหมู่ซัลเฟตอยู่มาก) ซึ่งจับโลหะได้ดี 	[52]
<ul style="list-style-type: none"> - ทดสอบระบบแบบกะ (Batch process) - <i>A. Sphaerica</i> (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) - อบแห้งสาหร่ายที่ 40 °C จนน้ำหนักคงที่ - ขนาดของสาหร่ายที่ใช้ทดสอบ 0.2 มิลลิเมตร 	Cd : 111.1 Pb : 121.9	<ul style="list-style-type: none"> - สภาวะที่เหมาะสมของ Cd : 60 นาที Dose: 2 g/L Pb : 90 นาที Dose: 1 g/L - ผล FTIR : หมู่ฟังก์ชัน (อะมิโน, ไฮดรอกซิล, C=O, C-O) มีความเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางชีวภาพ - กลไกหลัก Cd : คีเลชัน - Pb : แลกเปลี่ยนไอออน, คีเลชัน, รีดักชันและการตกตะกอนบนผนังเซลล์ 	[7]

ตาราง 2.5 (ต่อ)

สถานะในการทดลอง	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	หมายเหตุ	อ้างอิง
- ทดสอบการดูดซับของสาหร่าย 35 สายพันธุ์ เลือกลำสายพันธุ์ที่เหมาะสม 5 สายพันธุ์	Hg : 15.60-26.86 Cd : 61.68-109.57 Pb : 31.48-126.66	- <i>Calothrix parietina</i> (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) กำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด เหมาะสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพราะมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสูง เจริญเติบโตเร็ว และลักษณะเซลล์เป็นเส้นสาย ทำให้สะดวกในการแยกออกจากน้ำเสียโดยการกรอง	[49]
- ทดสอบระบบแบบกะ (Batch process) - <i>A. Sphaerica</i> (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) - อบแห้งสาหร่ายที่ 40 °C จนน้ำหนักคงที่ - ขนาดของสาหร่ายที่ใช้ทดสอบ 0.2 มิลลิเมตร	Cd : 111.1 Pb : 121.9	- สถานะที่เหมาะสมของ Cd : 60 นาที Dose: 2 g/L Pb : 90 นาที Dose: 1 g/L - ผล FTIR : หมู่ฟังก์ชัน (อะมิโน, ไฮดรอกซิล, C=O, C-O) มีความเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางชีวภาพ - กลไกหลัก Cd : คีเลชัน - Pb : แลกเปลี่ยนไอออน, คีเลชัน, ริดักชันและการตกตะกอนบนผนังเซลล์	[7]

จากการค้นคว้าหาข้อมูลพบว่าสาหร่ายเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่น่าสนใจอย่างยิ่งในการนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินยังเป็นสายพันธุ์ที่มีการศึกษาว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนักและทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี ซึ่งสายพันธุ์นี้สามารถพบได้ในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมและเป็นของเสียที่ต้องกำจัดออก จึงเป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยนี้เพื่อนำสาหร่ายซึ่งถือเป็นของเสียในระบบน้ำหล่อเย็นมาศึกษาและพัฒนาให้เกิดประโยชน์



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์

- เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) : ยี่ห้อ perkin elmer, รุ่น 4300DVD
- เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน Transmission Electron Microscope (TEM) : รุ่น JEM-2010
- เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) : รุ่น JSM-6400
- เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) : ยี่ห้อ perkin elmer (Spectrum One)
- เครื่อง UV-spectrophotometer : รุ่น J-301
- ตะแกรงร่อนอนุภาคขนาด 0.85 มิลลิเมตร
- เครื่องเขย่า
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- ตู้อบ
- กระดาษลิตมัส
- ขวดแก้วสีชา ขนาด 12 มิลลิลิตร
- แกลลอนน้ำขนาด 30 ลิตร
- กระดาษกรอง

3.1.2 สารเคมี

- สารยาสีเขียวแถมน้ำเงิน สายพ่นรูดอซิลลาทอเรีย จากบริษัท สยามพริท จำกัด
- น้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Fe, Ni) จากบริษัท อุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด
- นิกเกิล (II) ซัลเฟต (Nickel (II) sulfate), NiSO₄ : บริษัท แกมมาโก้

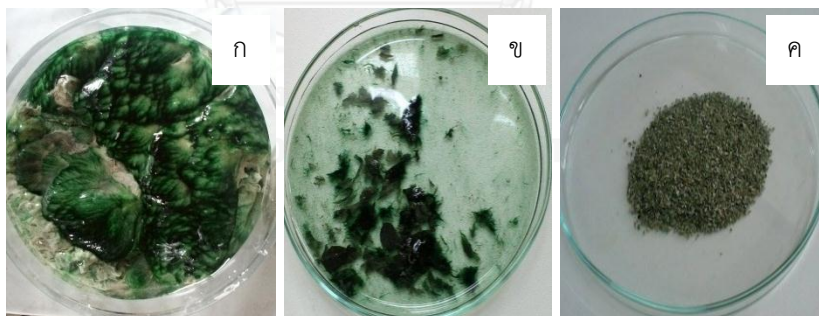
- ไอรอน (II) ซัลเฟต (Iron (II) sulfate), FeSO_4 : บริษัท แกมมาโก้
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide), NaOH : บริษัท Ajax Fineehem
- กรดไนตริก (Nitric acid), HNO_3 : บริษัท Ajax Fineehem
- อะซีโตน 90% (Acetone), $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$: บริษัท Ajax Fineehem

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะอธิบายการดำเนินการทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายที่ตายแล้ว (สาหร่ายแห้ง) และในส่วนที่สองอธิบายการดำเนินการทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายที่ยังมีชีวิต (สาหร่ายสด) โดยทำการทดลองในระบบโลหะผสมระหว่างเหล็กและนิกเกิล อัตราความเข้มข้นของโลหะทั้งสองชนิดคือ 1:1

3.2.1. การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายแห้ง

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสาหร่ายที่เจริญเติบโตในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามพริท จำกัด อุณหภูมิที่สาหร่ายเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 35-48 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยคือ 8.5



รูปที่ 3. 1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ใช้ในการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิล (ก) สาหร่ายที่เก็บมาจากโรงงาน สยามพริท จำกัด (ข) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่แยกตะกอนออกแล้ว (ค) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.85 มิลลิเมตร

สาหร่ายดังกล่าวจะถูกนำมาแยกตะกอน จากนั้นล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน ก่อนนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้น้ำหนักคงที่ สาหร่ายที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะ

ถูกบดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 0.85 มิลลิเมตร เพื่อลดขนาดของอนุภาคให้เล็กลง สำหรับยี่ห้อต่าง ๆ ที่เตรียมไว้สำหรับการทดลองหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ปริมาณสาหร่ายต่อน้ำเสียที่เหมาะสม ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียที่เหมาะสม เวลาในการดูดซับที่เหมาะสม และทดสอบการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานจริง

การทดลองหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแห้ง ทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 3, 4, 5 และ 7 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในการทดลอง น้ำเสียที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เตรียมจากสารประกอบเหล็กซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และสารประกอบนิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนสาหร่ายแห้งต่อน้ำเสียคือ 1 กรัมต่อลิตร ทำการทดสอบในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้สาหร่ายตกตะกอนและเก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในระบบผสมด้วยสาหร่ายแบบแห้งต่อไป

การทดลองหาปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแห้ง โดยอัตราส่วนของสาหร่ายต่อน้ำเสียที่ศึกษาคือ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดสอบในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้สาหร่ายตกตะกอนและเก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES

ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสม และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในระบบผสมด้วยสาหร่ายแบบแห้งต่อไป

การทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแห้ง โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ศึกษาคือ 1, 10, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณสาหร่ายใช้ค่าที่ได้จากการทดลองข้างต้น ทำการทดสอบในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้สาหร่ายตกตะกอนและเก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES

ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบผสมที่เหมาะสม ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสม และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในระบบผสมด้วยสาหร่ายแบบแห้งต่อไป

การทดลองหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแห้ง โดยเวลาที่ศึกษาคือ 10, 30 นาที 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณสาหร่ายและความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักได้จากค่าที่ได้จากการทดลองข้างต้น ทำการทดสอบในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อวินาที จากนั้นทิ้งไว้ให้สาหร่ายตกตะกอนและเก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES และสาหร่ายแห้งหลังการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสาหร่ายด้วยเทคนิค FTIR และดูการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของสาหร่ายทั้งก่อนและหลังกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยเครื่อง SEM

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบแห้งแล้ว จะทำการทดสอบการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบแห้งจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมจริง โดยน้ำเสียที่นำมาทดสอบมาจากโรงงาน อุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงธาตุองค์ประกอบในน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด

Element	mg/L
Mg	8.00
Ca	23.57
Al	8.80
Si	64.16
Fe	31.16
Ni	2.56

3.2.2. การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายสด

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย อายุ 2 สัปดาห์ (เป็นช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด) จากโรงงาน สยามฟริท จำกัด ถูกนำมาเลี้ยงต่อในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพสาหร่ายก่อนนำไปทำการทดลอง โดยให้แสง 12 ชั่วโมงและไม่ให้แสง 12 ชั่วโมง สาหร่ายที่ผ่านกระบวนการข้างต้นแล้วจะถูกนำไปทดลองกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยหาค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิด และเวลาของโลหะหนักแต่ละชนิดที่เหมาะสมในระบบโลหะผสม และทดสอบการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานจริง

การทดลองหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายสด ทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 1, 3, 5 และ 7 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในการทดลอง น้ำเสียที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เตรียมจากสารประกอบเหล็กซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และสารประกอบนิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เช่นเดียวกับการทดลองในสาหร่ายแบบแห้ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนสาหร่ายแห้งต่อน้ำเสียคือ 5 กรัม น้ำหนักสดต่อลิตร ซึ่งเมื่อคิดเป็นน้ำหนักแห้งจะได้ประมาณ 1 กรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดลองด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ทำการทดสอบในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES ส่วนสาหร่ายที่ผ่านการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเพื่อดูความทนต่อความเป็นกรด-ด่างของสาหร่ายแบบสด

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในระบบผสมด้วยสาหร่ายแบบสดต่อไป

การทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแบบสด โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ศึกษาคือ 1, 10, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนสาหร่ายแห้งต่อน้ำเสียคือ 5 กรัม น้ำหนักสดต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างคือค่าได้จากทดลองข้างต้น ทำการทดสอบในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES ส่วนสาหร่ายที่ผ่านการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเพื่อดูอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียต่อการมีชีวิตของเซลล์สาหร่ายแบบสด

ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบผสมที่เหมาะสม ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิเกิลจากน้ำเสียในระบบผสมด้วยสาหร่ายแบบสต่อไป

การทดลองหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแบบสต่อ โดยเวลาที่ศึกษาคือ 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักได้จากค่าที่ได้จากการทดลองข้างต้น ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับการทดลองการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแบบสต่อ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 ลักษณะเครื่องทดสอบการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบสต่อระบบน้ำวนและความคุมอุณหภูมิ ขนาด 30x50x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง และ (ค) ด้านในของตัวถัง

โดยปริมาณสาหร่ายที่ใช้คิดเป็นพื้นที่ 900 ตารางเซนติเมตรต่อน้ำเสีย 20 ลิตร เก็บน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตรและสาหร่ายสต่อ 1 กรัม เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิเกิลที่เหลือในสารละลายน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES และวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของสาหร่ายแห่งหลังการทดลองที่เวลาต่างๆ

การทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิเกิลด้วยสาหร่ายแบบสต่อจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมจริง โดยน้ำเสียที่นำมาทดสอบมาจากโรงงาน อุตสาหกรรมสเดนเลสเคทภัณฑ์ จำกัด ซึ่ง

มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบขึ้นมา สำหรับทำการทดลองการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแบบสตร แสดงดังรูปที่ 3.2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่เวลา 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กและนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ICP-OES

3.2.3. วิธีการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ [53]

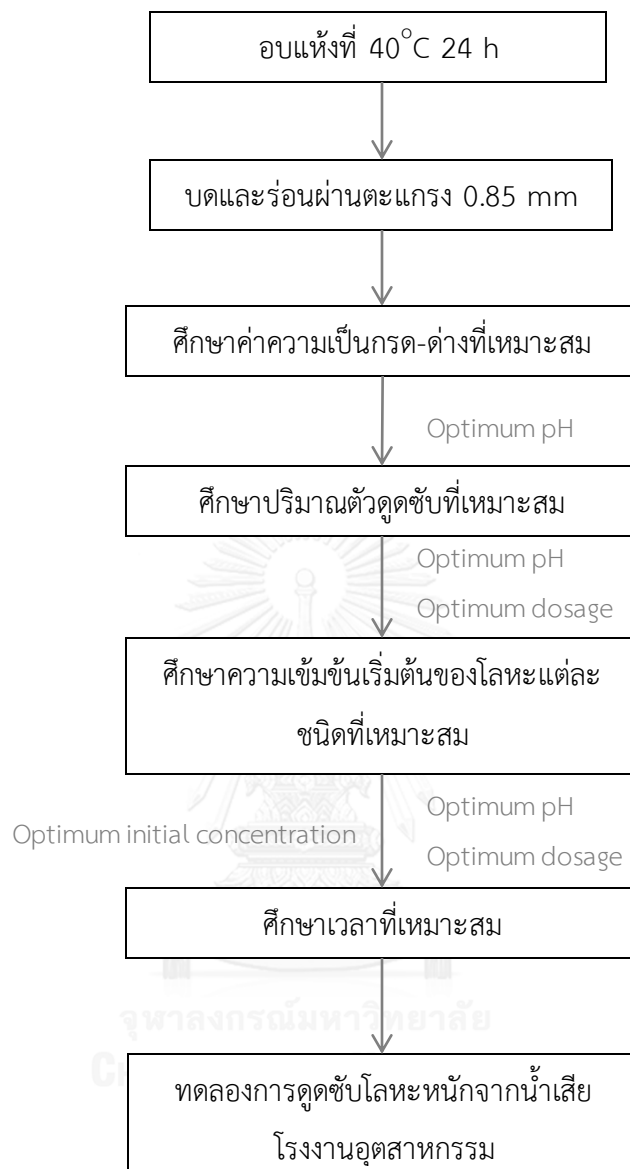
วิธีการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์เอที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการสกัดคลอโรฟิลล์เอด้วยสารละลายอะซีโตน 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- ใช้สารละลายอะซีโตน 20 มิลลิลิตร ต่อสาหร่าย 1 กรัม
- นำไปปั่นโดยเครื่องเซนติฟิวที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- แยกสาหร่ายออก แล้วนำสารละลายไปปั่นด้วยเครื่องเซนติฟิวอีกครั้งที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องมือวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 662, 645 นาโนเมตร
- นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์เอตามสมการที่ 3.1

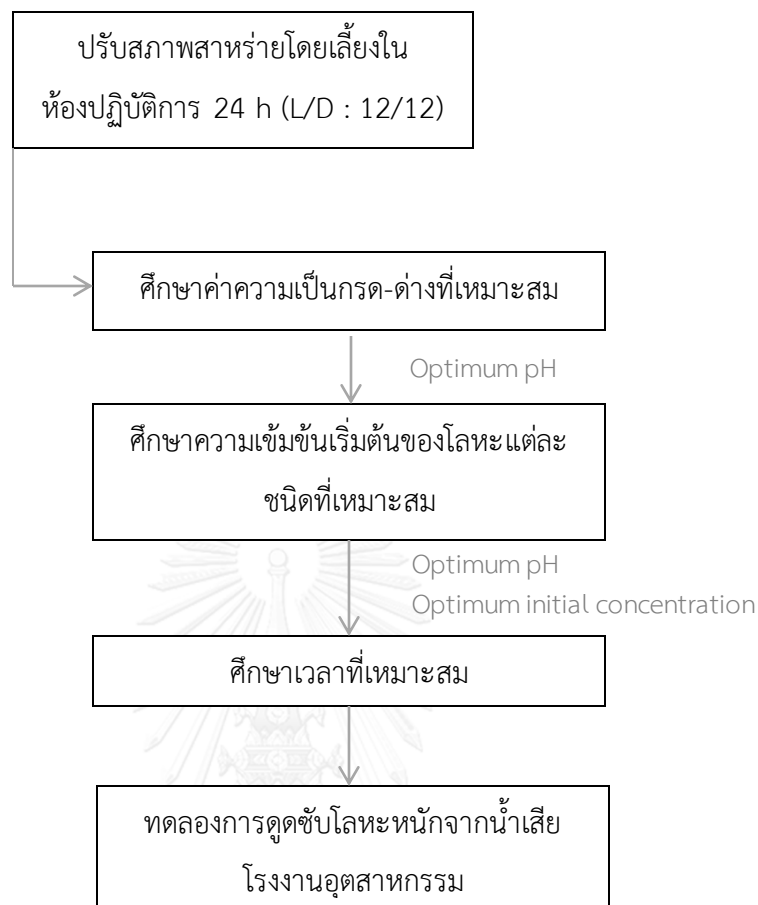
$$C_a = 11.75A_{662} - 2.350A_{645} \quad (3.1)$$

3.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือวิเคราะห์	สมบัติที่ศึกษา
Transmission Electron Microscope (TEM)	ความเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์ของสาหร่ายแบบสดก่อน-หลังการทดสอบ
Scanning Electron Microscope (SEM)	ความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวเซลล์ของสาหร่ายแบบแห้งก่อน-หลังการทดสอบ
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสาหร่าย
Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)	วัดความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษาการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วย
 สำหรับรายแบบแห้ง

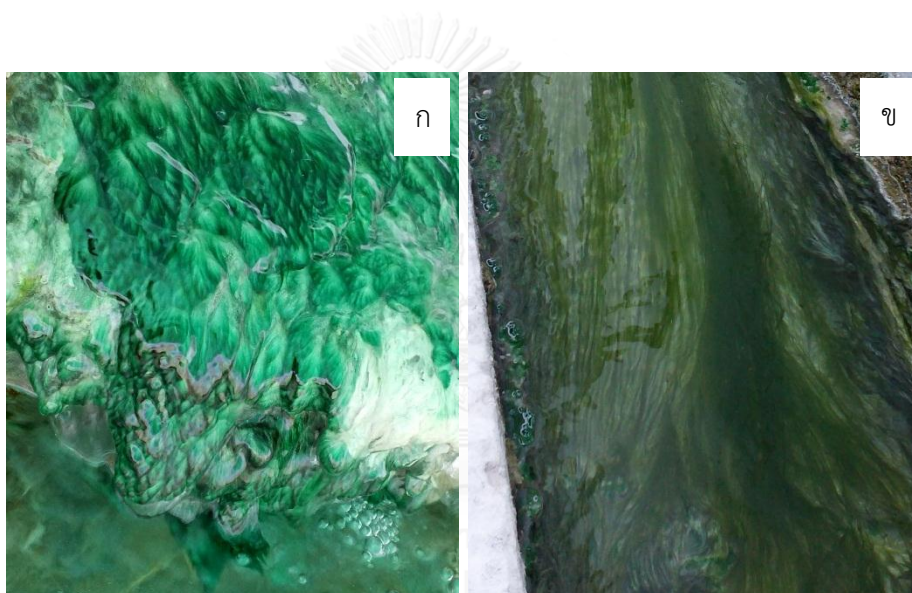


รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษาการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วย
สารช่วยแบบสด

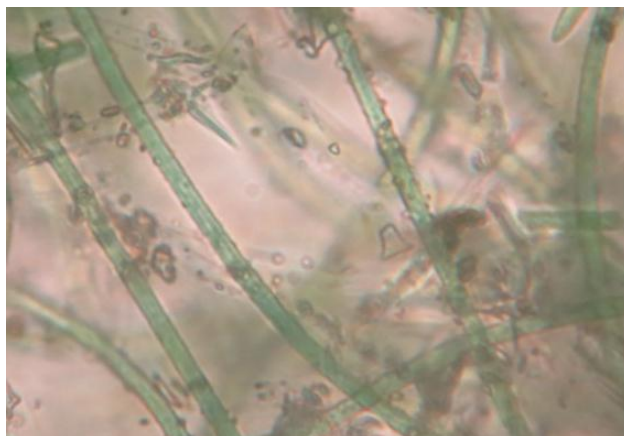
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สาหร่ายสีเขียวและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นสาหร่าย 2 สายพันธุ์ที่พบมากในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามพริท จำกัด สาหร่ายสีเขียวถูกพบในบางบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ส่วนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า คือ 35-48 องศาเซลเซียส ลักษณะของสาหร่ายทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีปริมาณมากกว่าและมีความทนต่อสภาวะแวดล้อมได้มากกว่าจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก [54]



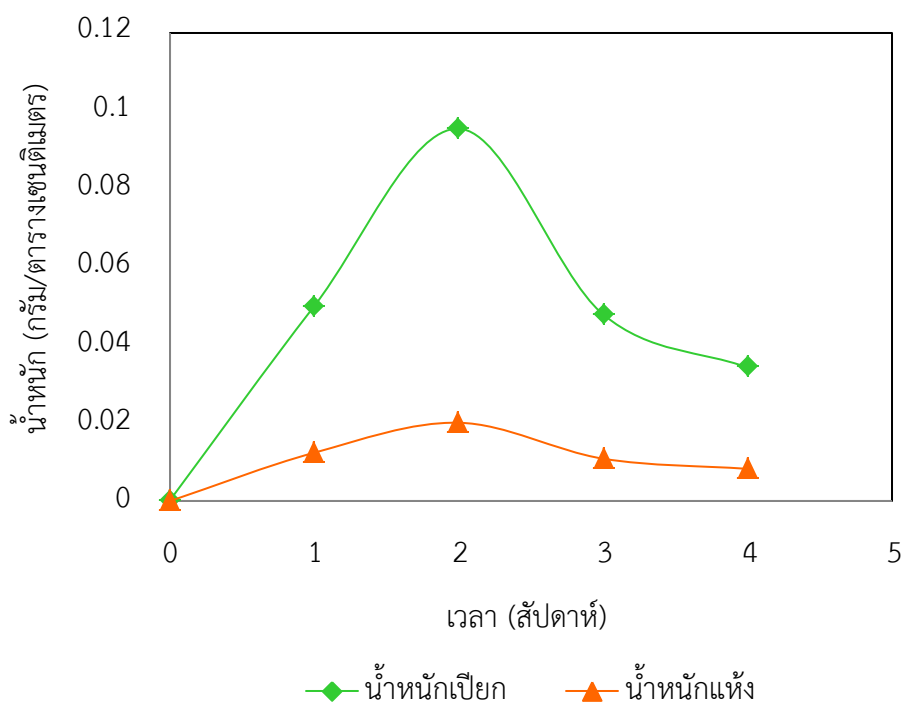
รูปที่ 4.1 สาหร่ายที่พบบริเวณระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามพริท จำกัด (ก) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน พบบริเวณที่มีอุณหภูมิช่วง 35-48 องศาเซลเซียส (ข) สาหร่ายสีเขียวพบบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สายพันธุ์
ออสซิลลาทอเรีย ที่มาจากโรงงาน สยามพริท จำกัด

ตั้งนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมาใช้ในการทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในระบบโลหะผสม โดยอัตราส่วนของโลหะแต่ละชนิดคือ 1:1 และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่พบเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย (*Oscillatoria sp.*) แสดงดังรูปที่ 4.2

อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสาหร่ายกับเวลาดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามพริท จำกัด ภายใน 4 สัปดาห์

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจากระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงาน สยามพริท จำกัด มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 โดยค่าอัตราความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตต่อวัน (relative growth rate, RGR) คำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

เมื่อ RGR คือ อัตราความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตต่อวันของสาหร่าย

W_1 คือ น้ำหนักสดของสาหร่ายที่เวลา t_1

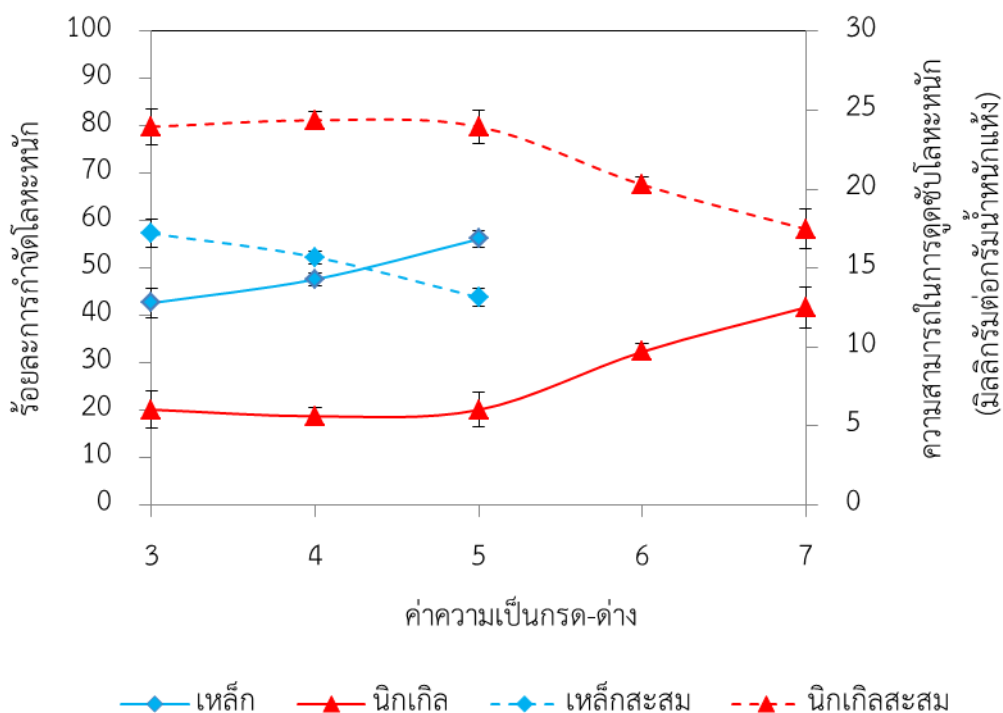
W_2 คือ น้ำหนักสดของสาหร่ายที่เวลา t_2

จากการคำนวณค่าอัตราความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตต่อวันของสาหร่ายมีค่าเท่ากับ 0.093 โดยช่วงอายุที่นำมาใช้ในการคำนวณจะใช้ช่วงสัปดาห์ที่ 1-2 ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตสูงสุด [55]

4.1 การดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง

4.1.1 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง

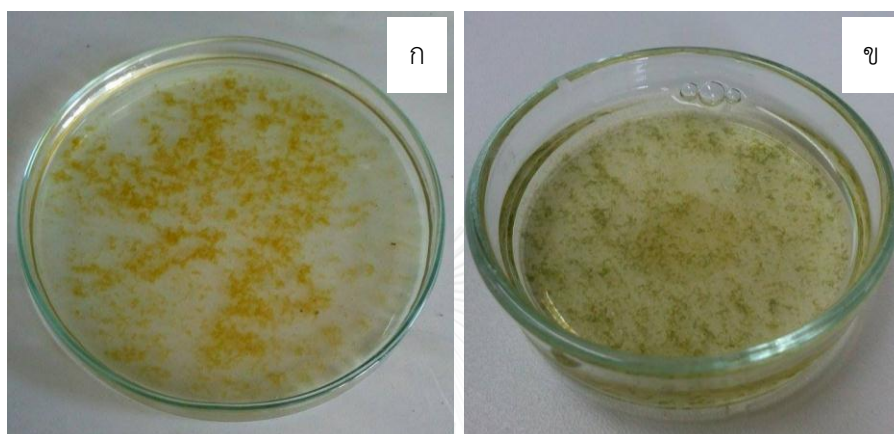
ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งสำหรับกระบวนการดูดซับโลหะหนัก รูปที่ 4.4 แสดงผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างต่อร้อยละการกำจัดเหล็กและนิกเกิล (กราฟเส้นทึบ) และผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย (กราฟเส้นประ) โดยศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3-7 พบว่าร้อยละการดูดซับเหล็กและนิกเกิลมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากการแข่งขันของอนุภาคโปรตอน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและ นิกเกิล และความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณสาหร่ายต่อน้ำเสียคือ 1 กรัมต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที

โดยปกติผนังเซลล์ของสาหร่ายจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่แสดงประจุเป็นลบ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำความเข้มข้นของอนุภาคโปรตอนจะสูงขึ้น อีกทั้งขนาดของอนุภาคโปรตอนเล็กกว่าไอออนของโลหะหนัก ทำให้ผิวของตัวดูดซับ (สาหร่าย) จะถูกปกคลุมไปด้วยโปรตอน ซึ่งจะเกิดแรงผลักไอออนบวกของโลหะหนัก ทำให้ไม่สามารถจับกับผิวของตัวดูดซับได้ และเมื่อค่าความเป็น

กรด-ต่างเพิ่มขึ้นปริมาณอนุภาคโปรตอนจะลดลง ผิวดำดูดซับเป็นประจุลบทำให้สามารถจับกับไอออนบวกของโลหะหนักได้ ประสิทธิภาพการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น การเพิ่มค่าความเป็นกรด-ต่างจึงเป็นการลดการแข่งขันของอนุภาคโปรตอนกับไอออนบวกของโลหะหนักบนผิวดำดูดซับ [7] นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กและนิกเกิลมีการตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ต่างที่ 6 และ 10 ตามลำดับ ลักษณะการตกตะกอนของโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดแสดงดังรูปที่ 4.5



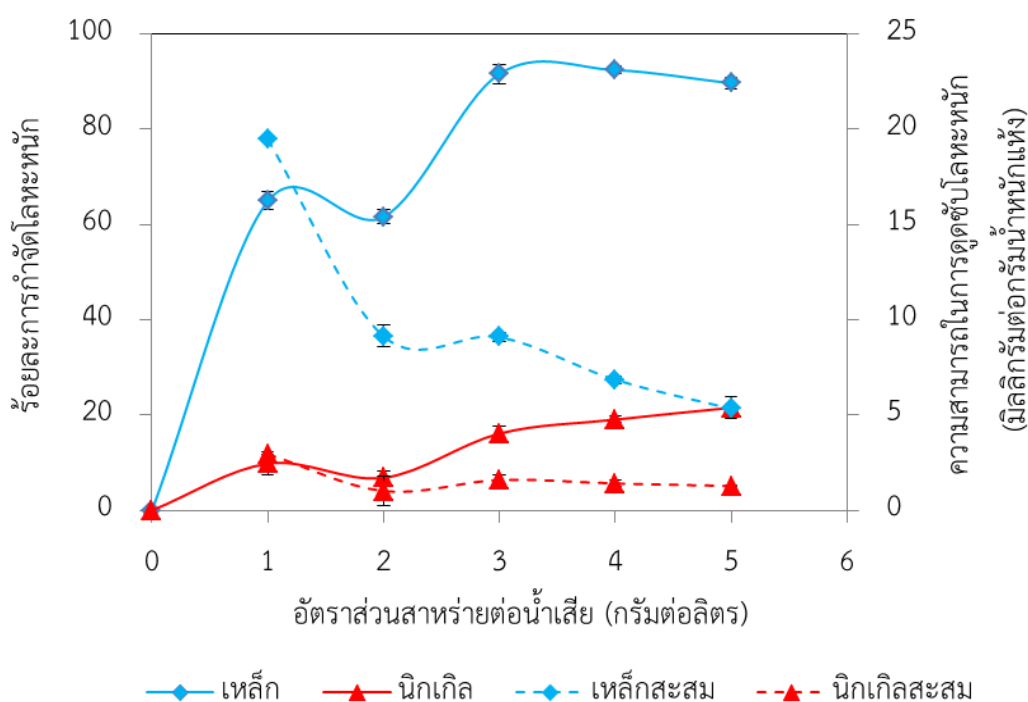
รูปที่ 4.5 ภาพแสดงลักษณะการตกตะกอนของโลหะหนัก (ก) เหล็กเริ่มตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ต่าง 6 (ข) นิกเกิลเริ่มตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ต่าง 10

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายน่าจะแนวโน้มเช่นเดียวกับร้อยละการกำจัดโลหะหนัก แต่เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ต่างต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย (กราฟเส้นประ) พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ต่างเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ต้องมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม เนื่องจากอาจมีอิทธิพลอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องนอกจากอิทธิพลของอนุภาคโปรตอน

การเลือกค่าความเป็นกรด-ต่างที่เหมาะสมพิจารณาจากร้อยละการกำจัดโลหะประกอบกับความสามารถในการดูดซับของสาหร่าย จากกราฟรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่ร้อยละการกำจัดโลหะพบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างยิ่งสูงยิ่งกำจัดโลหะได้มากขึ้น แต่ขีดจำกัดของการกำจัดเหล็กและนิกเกิลของงานวิจัยอยู่ที่ค่าความเป็นกรด-ต่างที่ 5 เนื่องจากการตกตะกอนของเหล็ก และเมื่อพิจารณาประกอบกับความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่ค่าความเป็นกรด-ต่างที่ 5 พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับค่อนข้างสูง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าความเป็นกรด-ต่างที่ 5 เป็นค่าความเป็นกรด-ต่างที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลองชุดต่อไป

4.1.2 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดการดูดซับและพื้นที่ที่ใช้สำหรับการดูดซับโลหะหนัก อัตราส่วนตัวดูดซับต่อน้ำเสียที่ศึกษาอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 5 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 จากกราฟรูปที่ 4.6 พบว่าร้อยละการกำจัดโลหะหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ โดยร้อยละสูงสุดสำหรับการกำจัดเหล็กคือ 91.70 ± 2.03 และร้อยละ 21.57 ± 2.24 สำหรับการกำจัดนิกเกิล ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ในการจับไอออนเชิงซ้อนของโลหะ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากกว่า 3 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ เนื่องจากเกิดสมดุลระหว่างปริมาณไอออนของโลหะหนักกับพื้นที่ดูดซับ และที่เหลือจากการดูดซับในสารละลาย [56, 57]



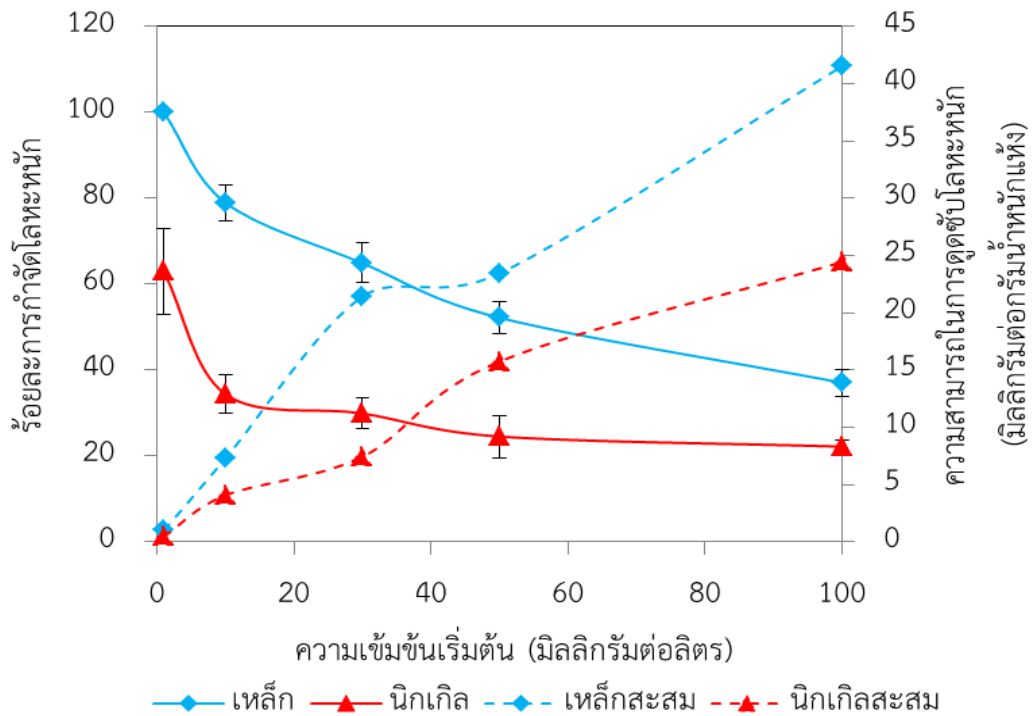
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสารห่วยแบบแห้ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (กราฟเส้นประ) พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่อกรัมของตัวดูดซับมีค่าลดลงจาก 19.48 ± 0.57 เหลือเพียง 5.33 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการดูดซับเหล็กและสำหรับการดูดซับนิกเกิลมีปริมาณลดลงจาก 2.95 ± 0.76 เหลือเพียง 1.28 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสองปัจจัยหลักด้วยกัน โดยปัจจัยแรกเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณ ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับจนอิ่มตัวได้ในระหว่างทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวดูดซับต่ำลง ปัจจัยอีกประการหนึ่งคืออาจเกิดการรวมตัวกันของตัวดูดซับเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง จึงเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับลดลง [56]

เมื่อพิจารณาร้อยละการกำจัดโลหะร่วมกับความสามารถในการกำจัดโลหะของสาหร่ายตามกราฟรูปที่ 4.6 พบว่าจุดที่มีร้อยละการกำจัดโลหะและความสามารถในการกำจัดโลหะสูงอยู่ที่จุดที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 1 กรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมนี้และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 จะถูกนำไปใช้ในการทดลองชุดต่อไป

4.1.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

ร้อยละการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน ทั้งค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ดังที่ได้แสดงผลการศึกษาข้างต้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักถือเป็นอีกปัจจัยสำคัญหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมจากน้ำเสียทำการศึกษาในช่วงความเข้มข้นที่ 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 5 และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้คือ 1 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดเหล็กลดลงจาก 100 เหลือเพียง 37.08 ± 3.15 และร้อยละการกำจัดนิกเกิลลดลงจาก 63 ± 9.9 เหลือเพียง 22.20 ± 1.59 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นจาก 1 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การที่ร้อยละการกำจัดโลหะหนักลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่การดูดซับของสาหร่ายมีอยู่อย่างจำกัด การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะเป็นการเพิ่มปริมาณอนุภาคของโลหะหนักในน้ำเสีย ในขณะที่พื้นที่ของตัวดูดซับมีปริมาณเท่าเดิม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarada et al. (2014) [57] ผลศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบผสมต่อร้อยละการกำจัดโลหะหนักและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ปริมาณตัวดูดซับคือ 1 กรัมต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที

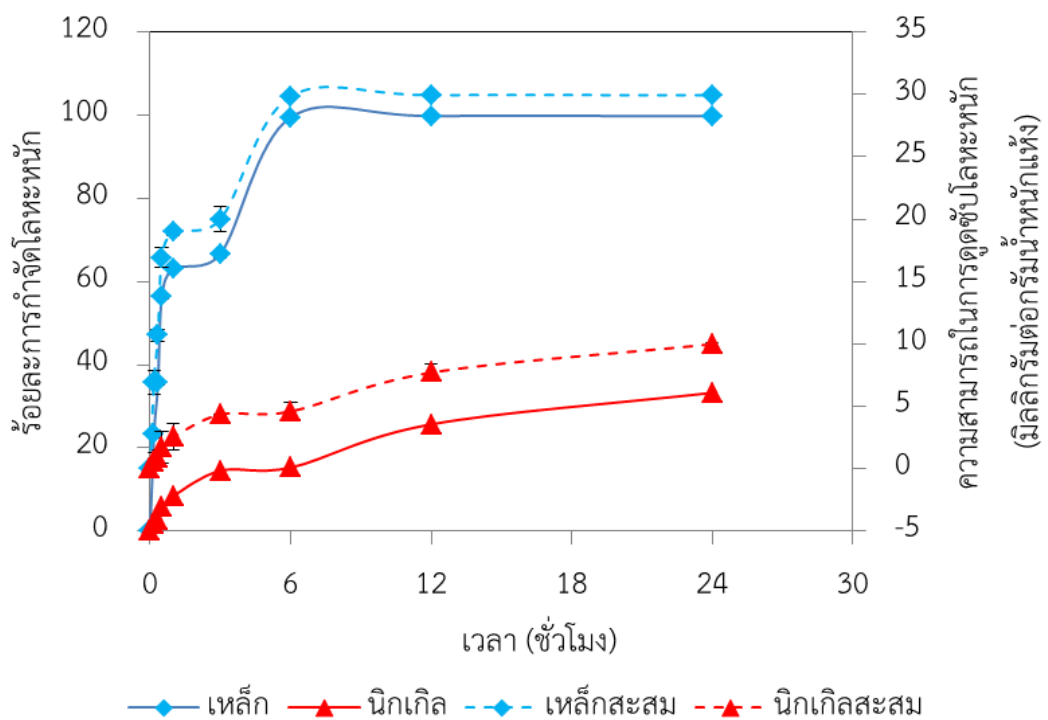
เมื่อพิจารณาความสามารถการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายจากกราฟรูปที่ 4.7 (กราฟเส้นประ) พบว่าทั้งเหล็กและนิกเกิลมีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือสาหร่ายดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจะทำให้เกิดแรงผลักดันใหญ่ (Driving force) ที่สามารถเอาชนะความต้านทานการถ่ายเทมวลระหว่างของแข็งและเฟสน้ำ ซึ่งเป็นผลให้ดูดซับไอออนของโลหะหนักได้สูงขึ้น [58]

เมื่อพิจารณาร้อยละการกำจัดโลหะหนักพร้อมกับความสามารถการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดโลหะหนักในระบบโลหะผสมด้วยสาหร่ายแบบแห้งคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.1.4 อิทธิพลของเวลาสัมผัส

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเทียบกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ทำการศึกษาที่เวลา 10 นาที 30 นาที 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร จากกราฟรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและอัตราการเพิ่มขึ้นค่อยลดลงหลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป จนค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 6 นั้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับโลหะหนักเข้าสู่สมดุลแล้ว

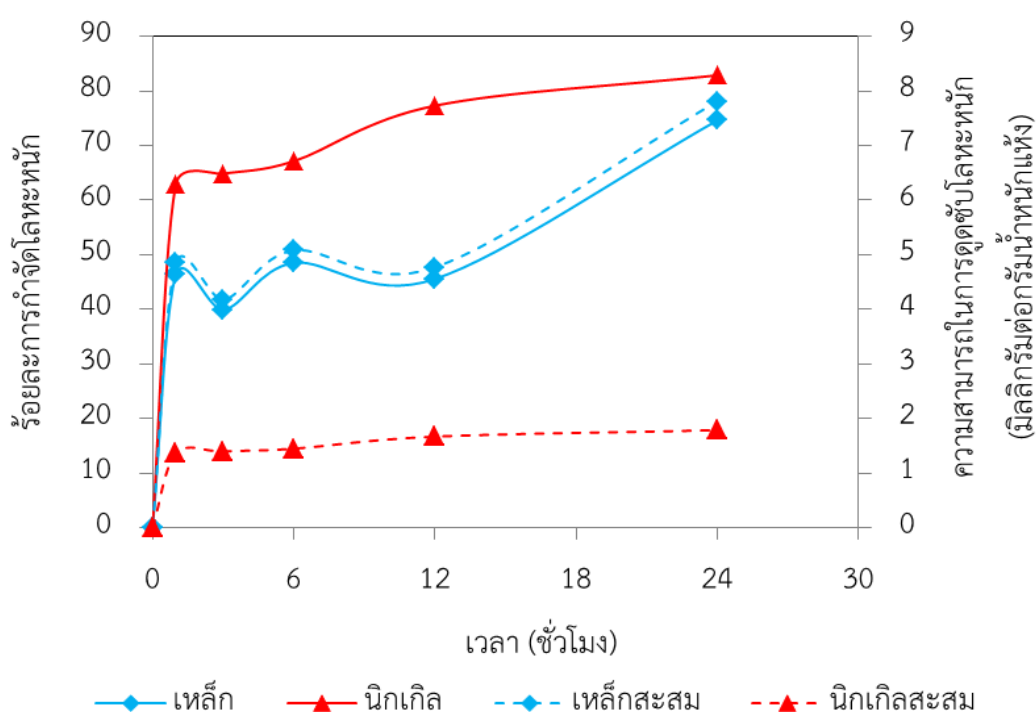
เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (กราฟเส้นประ) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับร้อยละการกำจัดโลหะหนัก ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้งคือ 1 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มียัตราการเพิ่มขึ้นของการดูดซับสูงที่สุด



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ปริมาณตัวดูดซับคือ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที

4.1.5. การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสหาร่ายแบบแห้ง

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสหาร่ายแบบแห้ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลสำหรับงานวิจัยนี้คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ปริมาณสหาร่ายต่อน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาที่เหมาะสมคือ 1 ชั่วโมง ซึ่งสำหรับการทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานจะให้ปริมาณสหาร่าย 1 กรัมต่อลิตร และเวลาที่เริ่มเก็บตัวอย่างคือ 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น



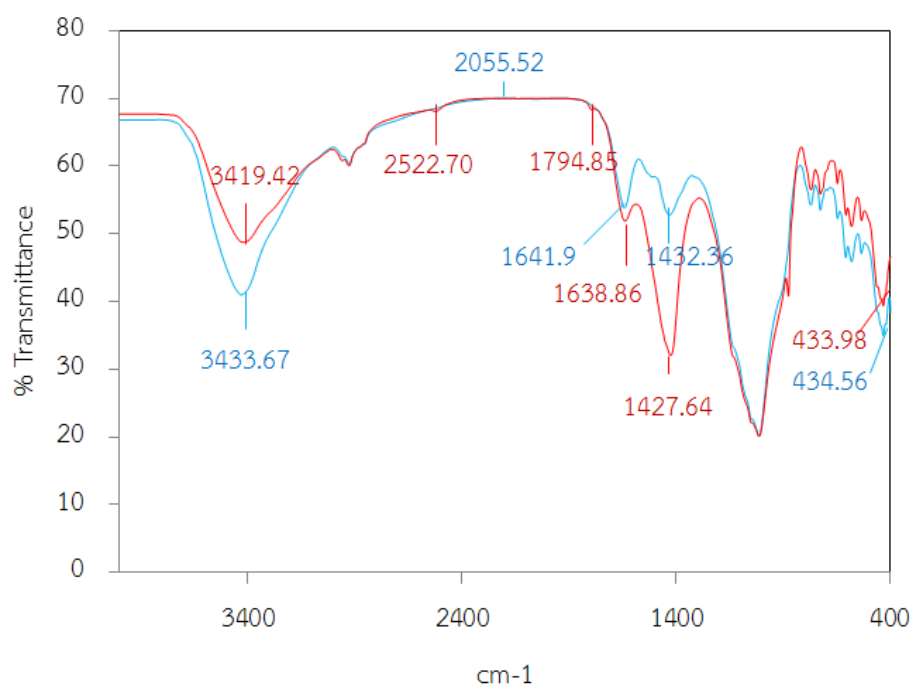
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสหาร่ายแบบแห้ง ปริมาณตัวดูดซับคือ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลคือ 10.47 และ 2.16 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที

น้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลคือ 31.16 และ 2.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกนำมาพักให้ตกตะกอนก่อนนำมาทดลอง ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลหลังการพักให้ตกตะกอนคือ 10.47 และ 2.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงาน

อุตสาหกรรมด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 5 จากกราฟรูปที่ 4.9 พบว่าสาหร่ายแบบแห้งสามารถดูดซับเหล็กสูงสุดได้ถึงร้อยละ 91.46 และดูดซับนิกเกิลสูงสุดได้ถึงร้อยละ 85.55 โดยร้อยละการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและชัดเจนภายใน 1 ชั่วโมงแรกและเข้าสู่สมดุลในเวลาต่อมา ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sheng et al. (2004) ที่พบว่าร้อยละ 90 ของกระบวนการดูดซับตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม สังกะสีและนิกเกิลด้วยสาหร่ายทะเล (*Sargassum sp.*, *Padina sp.*, *Ulva sp.* และ *Gracillaria*) เกิดขึ้นภายใน 1 ชั่วโมง [59] ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีปริมาณธาตุอื่นๆอยู่ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงขับ (Driving force) ขนาดใหญ่จึงสามารถเอาชนะความต้านทานการถ่ายเทมวลระหว่างของแข็งและเฟสน้ำ [57, 60]

4.2 การเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของสาหร่ายแห้งหลังการดูดซับโลหะหนัก

การเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับโลหะหนักจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy , FTIR) รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสาหร่ายก่อน (สีแดง) และหลัง (สีน้ำเงิน) กระบวนการดูดซับโลหะหนัก



รูปที่ 4.10 กราฟ FTIR แสดงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสาหร่ายแบบแห้งก่อน (สีแดง) และหลัง (สีน้ำเงิน) กระบวนการดูดซับเหล็กและนิกเกิล

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงตำแหน่งพีคการดูดซับและหมู่ฟังก์ชันจากกราฟ FTIR

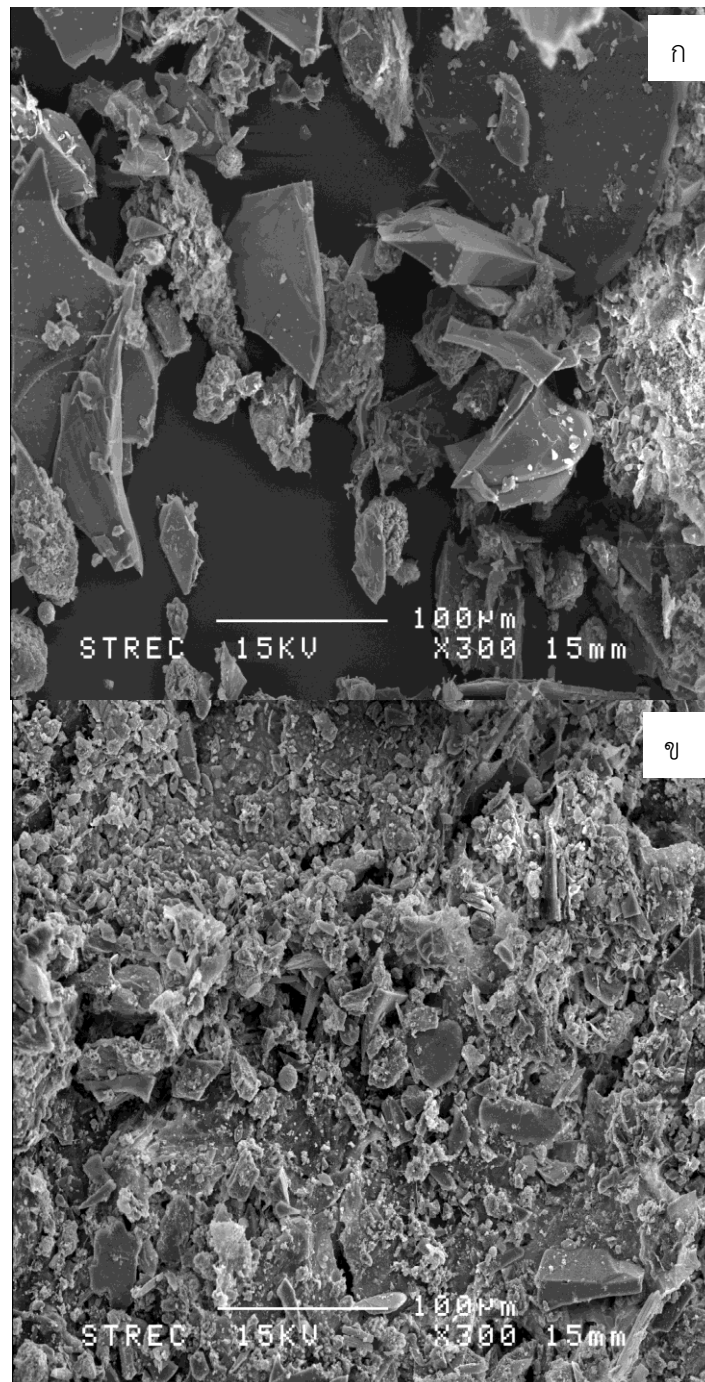
Band position (cm ⁻¹)			Description
Unloaded biomass	Loaded with iron and nickel ions		
3419.42	3433.67		N-H stretching เอมีนและเอมิด (3500-3200 cm ⁻¹)
2958.27	-		C-H stretching หมู่อัลคิล (3000-2800 cm ⁻¹)
2926.79	2926.08		C-H stretching หมู่อัลคิล (3000-2800 cm ⁻¹)
1794.85	-		C=O stretching แอนไฮไดรด์ (1820-1760 cm ⁻¹)
1638.86	1641.94		N-H bending 1 ^o เอมีน (1650-1590 cm ⁻¹)
1427.64	1432.36		C-H bending หมู่ CH ₃ (1450-1375)
1014.68	1014.70		C-O stretching อีเทอร์และเอสเทอร์ (1300-1000 cm ⁻¹)
876.57	-		Aromatics C-H
<800	<800		C-Cl (800-600 cm ⁻¹) C-Br (600-500 cm ⁻¹) C-I (<500 cm ⁻¹)

ผลการวิเคราะห์พบว่าหลังเกิดกระบวนการดูดซับตำแหน่งพีคที่ 3419.42, 1638.86 และ 1427.64 ต่อเซนติเมตร เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเปลี่ยนตำแหน่งไปที่ 3433.67, 1641.94 และ 1432.36 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพีคที่ 3419.42 และ 1638.86 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของหมู่เอมีน เนื่องจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่เอมีนจะอยู่ในช่วงความถี่ 3500-3200 ต่อเซนติเมตร (N-H stretching) และ 1650-1590 ต่อเซนติเมตร (N-H bending) และการเปลี่ยนแปลงพีคที่ 1427.64 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของหมู่อัลคิล

เนื่องจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่แอลคิลจะอยู่ในช่วงความถี่ 1450-1375 ต่อเซนติเมตร (C-H bending) โดยรายละเอียดของพีคการดูดซับอื่นๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญนี้ชี้ให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสาหร่ายมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่าย และหมู่ฟังก์ชันหลักที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนักสำหรับงานวิจัยนี้คือหมู่เอมีน (N-H) ซึ่งหมู่เอมีนนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์และสารเมือกที่เคลือบอยู่บนผนังเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และสารเมือกนี้เป็นลักษณะพิเศษของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่แตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่น โดยเมือกเป็นสารพอลิเมอร์โพลีแซ็กคาไรด์ (mucopolysacchhalide) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยในการจับโลหะหนัก

การเปลี่ยนแปลงภายนอกบนพื้นผิวของสาหร่ายทั้งก่อนและหลังกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบแห้งแสดงด้วยภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 4.11 โดยรูปที่ 4.11 (ก) เป็นภาพถ่ายพื้นผิวของสาหร่ายก่อนเกิดกระบวนการดูดซับ จะเห็นได้ว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบและมีขนาดเล็กอยู่อย่างกระจายตัวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.11 (ข) พบว่าพื้นผิวสาหร่ายมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยพื้นผิวสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการดูดซับจะมีลักษณะขรุขระและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคโลหะหรือระหว่างอนุภาคของสาหร่ายกันเองในระหว่างที่เกิดกระบวนการดูดซับ





รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของสาหร่าย (ก) ก่อน และ (ข) หลังกระบวนการดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิด 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ 1 กรัมต่อลิตรและทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

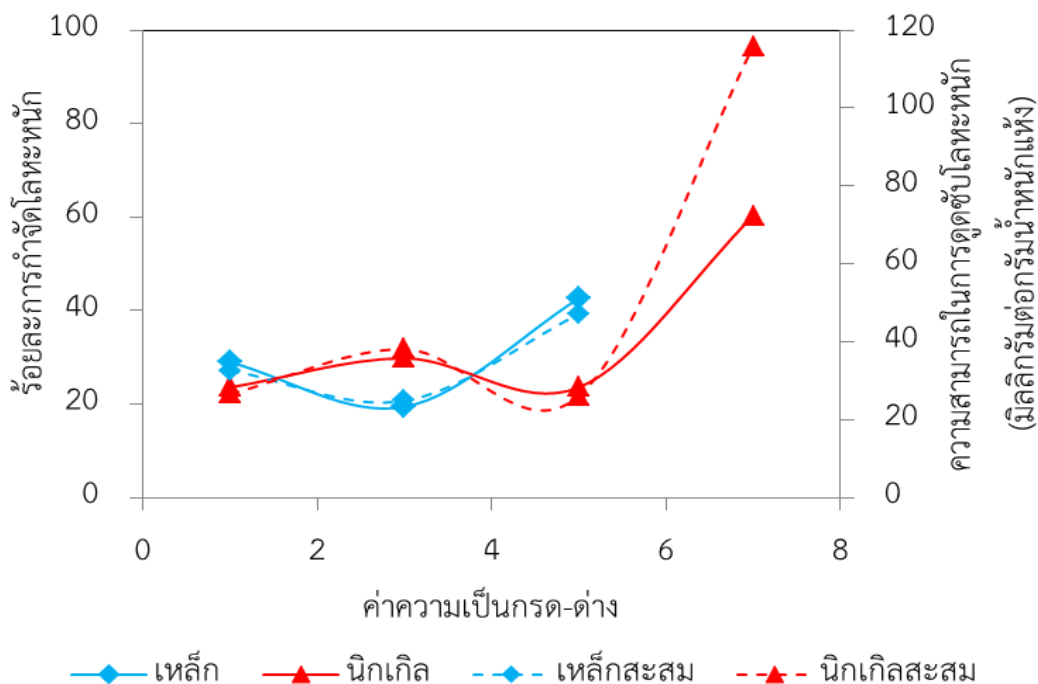
จากการศึกษาการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรม (สาหร่ายแบบแห้ง) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของเหล็กสูงกว่าการกำจัดไอออนของนิกเกิลอย่างเห็นได้ชัด สมมติฐานเบื้องต้นจึงคาดว่าอาจมีความเป็นไปได้เกี่ยวกับขนาดอนุภาคซึ่งจะมีผลต่อการเข้าไปอยู่รุ่มบนพื้นผิวของสาหร่ายแห้ง แต่เมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมีของโลหะทั้ง 2 ชนิด ทั้งมวลโมเลกุล รัศมีอะตอม รัศมีพันธะและสมบัติอื่นๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน สมมติฐานข้อนี้จึงไม่น่ามีความเป็นไปได้ ดังนั้นสาเหตุที่ไอออนของเหล็กมีการดูดซับได้ดีกว่านิกเกิลอาจเนื่องจากโปรตีนและหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์และเมื่อของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่มีความจำเพาะต่อเหล็กมากกว่านิกเกิลที่มีความเป็นพิษสูงกว่าเหล็ก เมื่อดังกล่าวมีลักษณะคล้ายวุ้นและเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่แตกต่างสาหร่ายชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ยังเป็นเพียงสมมติฐานที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

4.3 การดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบสด

4.3.1. อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง

อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 1-7 ต่อกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าร้อยละการกำจัดเหล็กและนิกเกิลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น และความสามารถสูงสุดในการดูดซับเหล็กและนิกเกิลของสาหร่ายแบบสดคือ 47.16 ± 1.38 และ 115.96 ± 6.62 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีเฉพาะคลอโรฟิลล์ชนิดเอเท่านั้น การทนต่อสภาวะกรดของสาหร่ายจึงถูกทดสอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอมีสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นและสูงสุดที่ 5 ซึ่งโดยปกติการทดลองการกำจัดโลหะหนักด้วยสาหร่ายสดจะไม่มีการศึกษาปัจจัยของความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากต้องเลี้ยงสาหร่ายในสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่แล้ว แต่สำหรับงานวิจัยนี้สนใจศึกษาความคงทนต่อความเป็นกรด-ด่างของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี



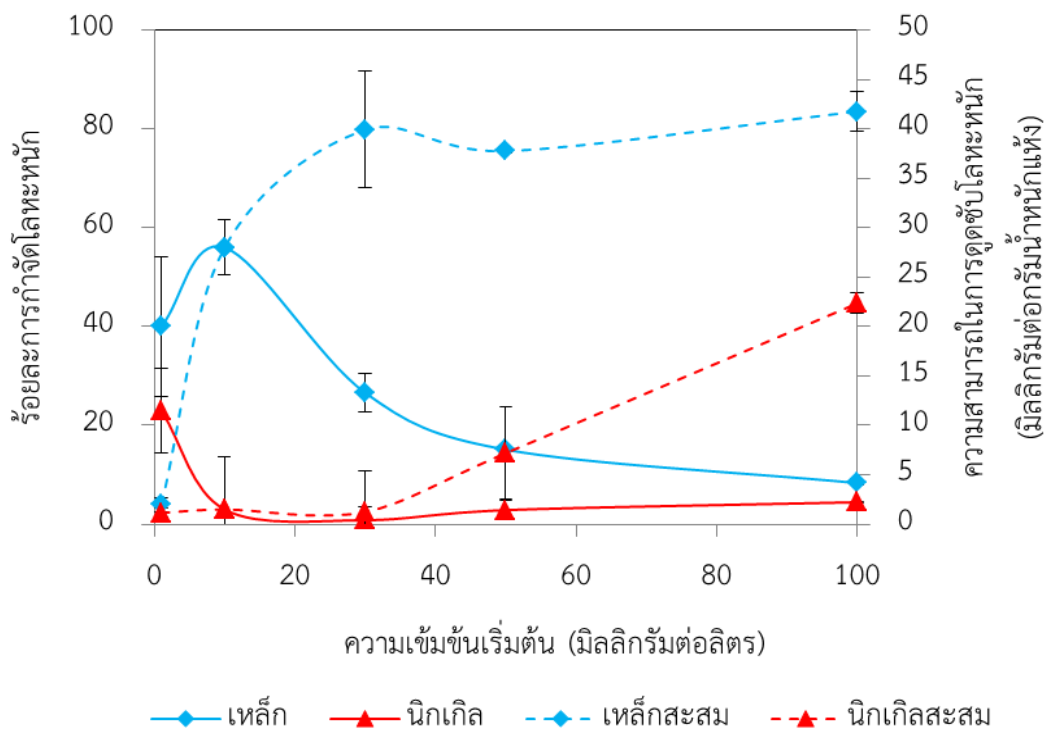
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อร้อยละการกำจัดโลหะหนักเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสารช่วยแบบสด ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณสารช่วยต่อน้ำเสียคือ 5 กรัม/น้ำหนักเปียกต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลในงานวิจัยนี้คือค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5 ซึ่งค่านี้จะนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสียต่อไป

4.3.2. อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองในระบบโลหะผสม อัตราความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลเป็น 1:1 โดยความเข้มข้นที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร ปริมาณสารช่วยที่ใช้ในการทดลองคือ 5 กรัม/น้ำหนักเปียกต่อลิตร ซึ่งเมื่อคิดเป็นน้ำหนักแห้งจะได้ 1 กรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับปริมาณที่ใช้ในการทดลองด้วยสารช่วยแบบแห้ง ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดเหล็กด้วยสารช่วยแบบสดจะค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและสูงที่สุดที่ความเข้มข้น

เริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าร้อยละการกำจัดเหล็ก



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยสาหร่ายแบบสด ค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 5 ปริมาณสาหร่ายต่อน้ำเสียคือ 5 กรัม/น้ำหนักเปียกต่อลิตร ทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่แปรผกผันกับปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเหล็กเป็นหนึ่งในธาตุอาหารสำหรับสาหร่าย ดังนั้นการดูดซับเหล็กในช่วงแรกจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเหล็กในน้ำเสียมีมากเกินไปความต้องการประสิทธิภาพการดูดซับเหล็กจึงค่อยๆ ลดลง

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายแบบสดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับสาหร่ายแบบแห้ง คือการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจะทำให้เกิดแรงผลักดันใหญ่ (Driving force) ที่สามารถเอาชนะความต้านทานการถ่ายเทมวลระหว่างของแข็งและเฟสน้ำ ซึ่งเป็นผลให้ดูดซับไอออนของโลหะหนักได้สูงขึ้น [58]

ผลของความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายแบบสโตคิโอสตาติคได้จากปริมาณคลอโรฟิลล์เอในตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดมีค่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักที่มากเกินไปเกิดความเป็นพิษต่อเซลล์สาหร่ายแบบสโตคิโอสตาติค

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายที่สภาวะต่างๆ

pH	Chlorophyll a (mg/g wet wt.)
1	3.76
3	6.51
5	7.94
7	5.07

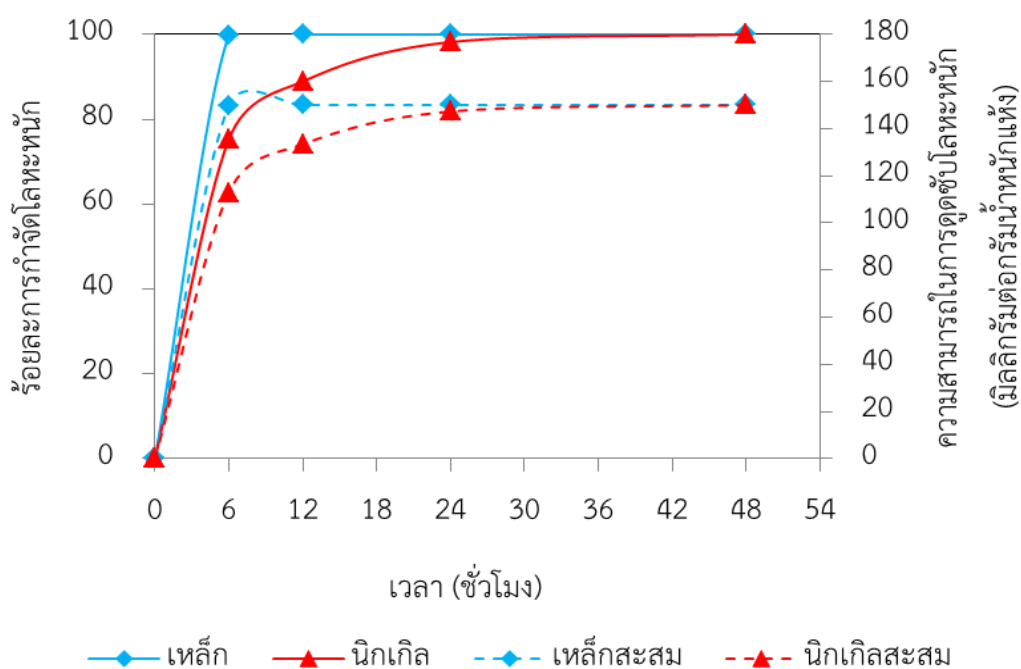
Conc.	Chlorophyll a (mg/g wet wt.)
1	2.86
10	5.63
30	8.58
50	5.57
100	3.55

contact time	Chlorophyll a (mg/g wet wt.)
0	9.89
6	7.94
12	8.01
24	4.95
48	3.63

4.3.3. อิทธิพลของเวลาสัมผัส

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเทียบกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับด้วยสาหร่ายสโตคิโอสตาติคที่เวลา 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดคือ 30

มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 โดยการทดลองนี้ใช้เครื่องมือที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับการทำการทดลองการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแบบสด และปริมาณสาหร่ายที่ใช้คิดเป็นพื้นที่ 900 ตารางเซนติเมตรต่อน้ำเสีย 20 ลิตร จากกราฟรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 6 ชั่วโมงแรก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chojnacka (2007) ที่ทำการศึกษากำจัดประจุโครเมียมในน้ำเสียด้วยสาหร่ายสไปรูริโน่า (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) โดยใช้เซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะสูงขึ้นไปอย่างรวดเร็วใน 7 ชั่วโมงแรก สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นก่อนกระบวนการสะสมตัวทางชีวภาพ (Bioaccumulation) [47] กระบวนการกำจัดโลหะด้วยสาหร่ายแบบสดจะเข้าสู่สมดุลภายใน 12 ชั่วโมงสำหรับเหล็กและ 24 ชั่วโมงสำหรับนิกเกิล ความสามารถสูงสุดในการสะสมเหล็กและนิกเกิลของสาหร่ายจากน้ำเสียสังเคราะห์คือ 150 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง สำหรับกระบวนการกำจัดโลหะด้วยสาหร่ายแบบสดจะให้ความสามารถในการสะสมโลหะได้ดีกว่าการใช้สาหร่ายแบบแห้ง เนื่องจากการเจริญเติบโตและการฟื้นฟูผิวหน้าของเซลล์ในระหว่างที่ประจุของโลหะถูกขนส่งเข้าสู่ภายในเซลล์ [47]

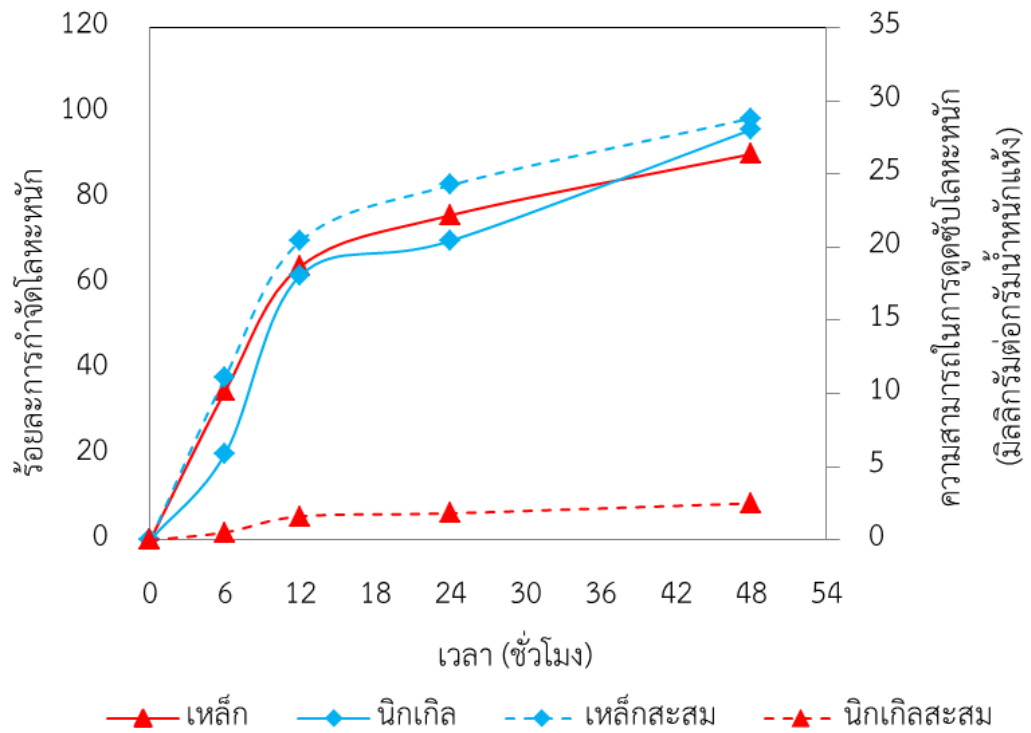


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายแบบสด ค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแต่ละชนิดในระบบโลหะผสมคือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที

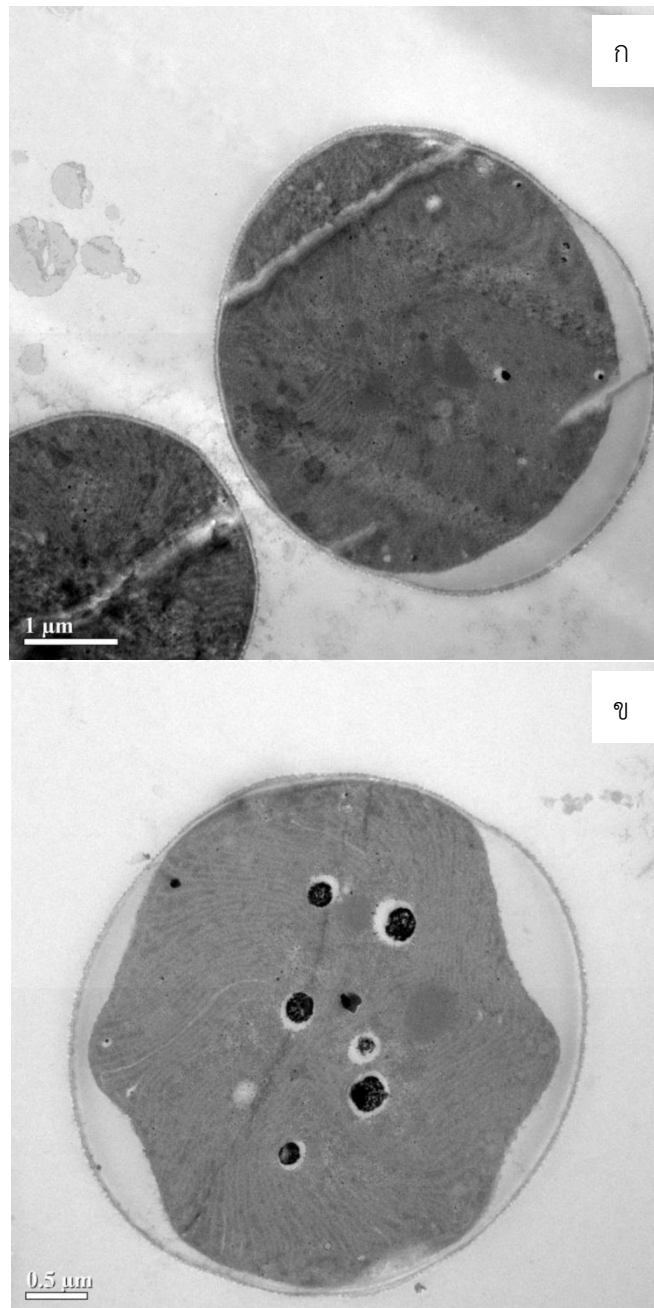
ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสาหร่ายสด (กราฟเส้นประ) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับร้อยละการกำจัดโลหะหนัก คือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 6 ชั่วโมงแรก ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์คือ 6 ชั่วโมง

4.3.4 การกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสาหร่ายแบบสด

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลนำมาจากโรงงานอุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลคือ 31.16 และ 2.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับทำการทดลองการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายแบบสด ซึ่งเป็นระบบน้ำวน อัตราการไหลเท่ากับ 1.2 ลิตรต่อนาที ปริมาณสาหร่ายที่ใช้คิดเป็นพื้นที่ 900 ตารางเซนติเมตรต่อน้ำเสีย 20 ลิตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการทดสอบน้ำเสียสังเคราะห์ แต่การทดสอบน้ำเสียจากโรงงานจะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าและใช้เวลาเข้าสู่สมดุลนานกว่าการทดสอบในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องมาจากน้ำเสียจากโรงงานมีองค์ประกอบหลายธาตุด้วยกัน ดังนั้นในระหว่างกระบวนการสะสมโลหะหนัก จึงมีอิทธิพลของธาตุองค์ประกอบอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้เหล็กและนิกเกิลสะสมเข้าสู่เซลล์ได้น้อยลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Flouty et al. (2012) ที่ทำการศึกษาโลหะชนิดที่สองต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิลด้วยสาหร่ายสีเขียวที่มีชีวิต (*Chlamydomonas reinhardtii*) พบว่าความสามารถในการดูดซับนิกเกิลด้วยลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโลหะชนิดที่สอง เนื่องจากมีการแข่งขันการดูดซับประจุโลหะอื่นกับประจุของนิกเกิลในการขนส่งเข้าสู่เซลล์ [24] และจากภาพถ่าย TEM ในรูปที่ 4.16 แสดงลักษณะของเหล็กและนิกเกิลที่เข้าไปอยู่ภายในเซลล์ของสาหร่าย โดยรูปที่ 4.16 (ก) แสดงลักษณะของเซลล์สาหร่ายแบบสดก่อนการดูดซับไอออนของเหล็กและนิกเกิล และรูปที่ 4.16 (ข) แสดงลักษณะของเซลล์สาหร่ายแบบสดหลังการดูดซับไอออนของเหล็กและนิกเกิล ซึ่งจะเห็นว่าภาพถ่ายภายในเซลล์หลังการดูดซับมีจุดสีดำเข้มเกิดขึ้นอย่างชัดเจน และจากผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ยืนยันได้ว่าจุดสีดำที่เกิดขึ้นนั้นคืออนุภาคของเหล็ก แต่ไม่พบอนุภาคของนิกเกิลเนื่องจากสาหร่ายดูดซับนิกเกิลในปริมาณที่น้อยกว่าเหล็กอย่างมากและการวิเคราะห์ด้วย EDX เป็นการสุ่มวิเคราะห์ที่ในบางจุดเท่านั้น และจากตารางที่ 4.3 พบว่าคลอโรฟิลล์เอมีปริมาณลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แสดงถึงความทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนักของเซลล์ลดลง เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปไอออนของเหล็กและนิกเกิลมีการสะสมตัวเข้าสู่ภายในเซลล์มากขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอิทธิพลของเวลาในการดูดซับต่อร้อยละการกำจัดโลหะเหล็กและนิกเกิลและความสามารถในการจับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยสารหลายแบบสด ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและนิกเกิลคือ 31.16 และ 2.56 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย TEM แสดงลักษณะภายในเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*Oscillatoria* sp.) (ก) ก่อนและ (ข) หลังกระบวนการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบสด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิด 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 เวลาในการทดลอง 6 ชั่วโมง

จากการศึกษาการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้สาหร่ายแบบสด พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของเหล็กสูงกว่าการกำจัดไอออนของนิกเกิลอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับการทดลองด้วยสาหร่ายแบบแห้ง ทั้งนี้ในการใช้สาหร่ายแบบสดนั้นต้องพิจารณาหลักการกำจัดโลหะหนัก 2 กลไกด้วยกัน โดยกลไกแรกคือการดูดซับที่พื้นผิวภายนอกเซลล์หรือเรียกว่ากลไกการดูดซับ (Biosorption) โดยกลไกนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการใช้สาหร่ายแบบแห้งคืออาจเป็นผลจากโปรตีนและหมู่ฟังก์ชันบนผนังเซลล์และเมือก ซึ่งยังต้องทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว ส่วนกลไกที่สองเป็นกลไกการสะสมตัวของโลหะหนักเข้าสู่ภายในเซลล์โดยจะมีโปรตีนเข้ามาเกี่ยวข้องในการขนส่ง ซึ่งโปรตีนเหล่านี้จะมีความจำเพาะกับเหล็กมากกว่านิกเกิล เนื่องจากนิกเกิลมีความเป็นพิษมากกว่าเหล็ก อีกหนึ่งกลไกการจับโลหะหนักคือกลไกการตกตะกอนภายในเซลล์ เนื่องจากการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สาหร่ายสดมีกระบวนการเผาผลาญภายในเซลล์เข้ามาเกี่ยวข้อง คลอโรฟิลล์จะช่วยในการสังเคราะห์แสงซึ่งจะจับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เซลล์ และเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลไอออนอยู่บริเวณขอบผนังด้านในของเซลล์สาหร่าย ไฮดรอกซิลไอออนจะทำหน้าที่จับไอออนบวกของโลหะหนักที่ผ่านเข้ามาภายในเซลล์ [13]

จากการศึกษาการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียในระบบโลหะผสมด้วยสาหร่ายที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมทั้งแบบแห้งและแบบสด แสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 ตารางเปรียบเทียบผลการศึกษาการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียของสาหร่ายแบบแห้งและสาหร่ายแบบสด

ตัวแปร	สาหร่ายแบบแห้ง	สาหร่ายแบบสด
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	แปรผันตรงกับร้อยละการดูดซับ	
ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น	แปรผกผันกับร้อยละการดูดซับ	
ปริมาณตัวดูดซับ	1 กรัมต่อลิตร	-
เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ		
น้ำเสียสังเคราะห์	1 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม	1 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยสารยาสีเขียวแถมน้ำเงิน สายพันธุ์ออสซิลลาทอเรีย ทั้งแบบแห้งและแบบสด

สภาวะ	สำหรับแบบแห้ง	สำหรับแบบสด
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	5	5
ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	30	10
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม ต่อลิตร)	1	-
เวลา(ชั่วโมง)	1	6

5.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลโดยใช้สารยาสีเขียวแถมน้ำเงินที่เจริญเติบโตได้ดีในระบบน้ำหล่อเย็น

ประสิทธิภาพ	โลหะ หนัก	สำหรับแห้ง		สำหรับสด	
		น้ำสังเคราะห์	น้ำโรงงาน	น้ำสังเคราะห์	น้ำโรงงาน
ความสามารถในการ ดูดซับโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกรัม)	เหล็ก	18.96	4.85	149.75	11.14
	นิกเกิล	2.54	1.36	112.90	0.53
ร้อยละการกำจัดโลหะ หนัก	เหล็ก	63.20	46.32	99.83	34.95
	นิกเกิล	8.47	62.96	75.27	20.31

5.1.3 กระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยสารยาสีเขียวแถมน้ำเงินที่มี
ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดต่ำกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.4 กระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิลด้วยสารยาสีเขียวแถมน้ำเงินที่มี
ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.5 สาหร่ายแบบแห้งเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่าสาหร่ายแบบสด เนื่องจากง่ายต่อการนำไปใช้งานและใช้เวลาในการดูดซับน้อยกว่า

5.2. ข้อเสนอแนะ

- ควรเพิ่มการศึกษาผลการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยสาหร่ายในระบบโลหะเดียว
- ควรศึกษาหาปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับเหล็กและนิกเกิลโดยใช้สาหร่ายแบบสด
- ศึกษากระบวนการคายซับของสาหร่ายแบบแห้งหลังผ่านกระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กและนิกเกิล เพื่อดูประสิทธิภาพในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ



รายการอ้างอิง

- [1] Farooq, U., Kozinski, J.A., Khan, M.A., and Athar, M., Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – A review of the recent literature. **Bioresource Technology**, 2010. 101(14): p. 5043-5053.
- [2] Castenholz, R.W., Thermophilic Blue-Green Algae and the Thermal Environment. **American Society for Microbiology**, 1969. 33: p. 476-504.
- [3] พีรพรพิศาล, ย. สาขาวิชาวิทยา **Phycology**. เชียงใหม่: โชนาพริ้นท์, 2006.
- [4] Flouty, R. and Estephane, G., Bioaccumulation and biosorption of copper and lead by a unicellular algae *Chlamydomonas reinhardtii* in single and binary metal systems: A comparative study. **Journal of Environmental Management**, 2012. 111(0): p. 106-114.
- [5] Zenghuan Wang, X.W., Changliang Ke, Bioaccumulation of trace metals by the live macroalga *Gracilaria lemaneiformis*. **Journal of Applied Phycology** 2014. 26(4): p. 1889-1897
- [6] Volesky, B. **Biosorption of heavy metals**. Florida: Boca Raton, 1990.
- [7] Abdel -Aty, A.M., Ammar, N.S., Abdel Ghafar, H.H., and Ali, R.K., Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga *Anabaena sphaerica* biomass. **Journal of Advanced Research**, 2013. 4(4): p. 367-374.
- [8] De-ju Cao, X.-d.S., Hao Li, Pan-pan Xie, Hui-min Zhang, Juan-wei Deng, Effects of lead on tolerance, bioaccumulation, and antioxidative defense system of green algae, *Cladophora*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2015. 112: p. 231-237.
- [9] An, B., et al., Applicability and toxicity evaluation of an adsorbent based on jujube for the removal of toxic heavy metals. **Reactive and Functional Polymers**, 2015. 93: p. 138-147.
- [10] Prithviraj, D., et al., Biosorption of nickel by *Lysinibacillus* sp. BA2 native to bauxite mine. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2014. 107: p. 260-268.

- [11] ทองไทย, ย. การกำจัดเหล็กและแมงกานีสออกจากน้ำผิวดินโดยวิธีจาร์เทศใน ห้องปฏิบัติการด้วยปูนขาวและแมกนีเซียมคาร์บอเนต. มหาคณิสิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ ศึกษา ธรณีวิทยา, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร, 2552.
- [12] Ninpradubkaew, N. **Adsorption of urea from aqueous solution by using hierarchical porous carbon monolith**. Master degree, Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2014.
- [13] Sud, D., Mahajan, G., and Kaur, M.P., Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. **Bioresource Technology**, 2008. 99(14): p. 6017-6027.
- [14] Brooks, R.R. **Plants that Hyperaccumulate Heavy metals**. Wallingford, Oxon, UK ; New York: CAB international, 1998.
- [15] วงศ์รัตน์, ล. แพลงก์ตอนพืช, ed. 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2001.
- [16] G.W. Prescott, J.B., Edward T. Cawley. **How to know the Freshwater Algae**, ed. 3: W.M.C. Brown Company Publisher 1978.
- [17] Ting Yang, M.-L.C., Jian-Hua Wang, Genetic and chemical modification of cells for selective separation and analysis of heavy metals of biological or environmental significance. **Trends in analytical chemistry**, 2015. 66: p. 90-102.
- [18] Chojnacka, K. **Biosorption and bioaccumulation in practice**. New York Nova Science, 2009.
- [19] Roula Flouty, G.E., Bioaccumulation and biosorption of copper and lead by a unicellular algae *Chlamydomonas reinhardtii* in single and binary metal systems: A comparative study. **Journal of Environmental Management**, 2012. 111: p. 106-114.
- [20] Hu, S., Tang, C.H., and Wu, M., Cadmium accumulation by several seaweeds. **Science of The Total Environment**, 1996. 187(2): p. 65-71.
- [21] Aller, A.J. and Castro, M.A., Live bacterial cells as analytical tools for speciation analysis: Hypothetical or practical? **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, 2006. 25(9): p. 887-898.

- [22] Mack, C., Wilhelmi, B., Duncan, J.R., and Burgess, J.E., Biosorption of precious metals. **Biotechnology Advances**, 2007. 25(3): p. 264-271.
- [23] Gadd, G.M., Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 2009. 84(1): p. 13-28.
- [24] Flouty, R. and Khalaf, G., Role of Cu and pb on Ni bioaccumulation by *Chlamydomonas reinhardtii*: Validation of the biotic ligand model in binary metal Mixtures. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2015. 113(0): p. 79-86.
- [25] Gadd, G.M., Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. **J Chem Technol Biotechnol**, 2009. 84: p. 13-28.
- [26] Schiewer, S. and Wong, M.H., Ionic strength effects in biosorption of metals by marine algae. **Chemosphere**, 2000. 41(1-2): p. 271-282.
- [27] Aksu, Z., Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of nickel(II) ions onto *Chlorella vulgaris*. **Process Biochemistry**, 2002. 38(1): p. 89-99.
- [28] Markai, S., Andrès, Y., Montavon, G., and Grambow, B., Study of the interaction between europium (III) and *Bacillus subtilis*: fixation sites, biosorption modeling and reversibility. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2003. 262(2): p. 351-361.
- [29] Anirudhan, T.S. and Sreekumari, S.S., Adsorptive removal of heavy metal ions from industrial effluents using activated carbon derived from waste coconut buttons. **Journal of Environmental Sciences**, 2011. 23(12): p. 1989-1998.
- [30] Chojnacka, K., Bioaccumulation of Cr(III) ions by Blue-Green alga *Spirulina* sp. Part I. A Comparison with Biosorption. **American Journal of Agricultural and Biological Science**, 2007. 2(4): p. 218-223.
- [31] Gadd, G.M., Microbial formation and transformation of organometallic and organometalloid compounds. **FEMS Microbial. Rev.**, 1993. 11: p. 297-316.
- [32] Hansen, C.L., Zwolinski, G., Martin, D. & Williams, J. W., Bacterial removal of mercury from sewage. **Biotechnol. Bioengng.**, 1984. 26: p. 1330-1333.

- [33] Kierans, M., Staines, A. M., Bennett, H. & Gadd, G. M., Silver tolerance and accumulation in yeasts. **Biol. Metals**, 1991. 4: p. 100-106.
- [34] Williams, J.W.S., r S., Bacterial resistance and detoxification of heavy metals. **Enzyme Microb. Technol.**, 1984. 6: p. 530-537.
- [35] Christopher White, S.C.W.G.M.G., The Role of Microorganisms in Biosorption of Toxic Metals and Radionuclides. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 1995: p. 17-40.
- [36] Gadd, G.M.W., C., Microbial treatment of metal pollution -a working biotechnology? **Trends Biotechnol.**, 1993. 11: p. 353-359.
- [37] Sangit Varma, D.S., Sagar Wakale, B. A. Bhanvase, M. P. Deosarkar Removal of Nickel from Waste Water Using Graphene Nanocomposite. **International Journal of Chemical and Physical Sciences**, 2013. 2.
- [38] Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Sharma, M., and Saini, V.K., Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. **Water Research**, 2003. 37(16): p. 4038-4044.
- [39] Piyush Kant Pandey, S.C., Yashu Verma, Madhurima Pandey, S. S. Kalyan Kamal and K. Chandrashekhar, Biosorptive Removal of Ni(li) from Wastewater and Industrial Effluent **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2007. 4(4): p. 332-339.
- [40] Juan Carlos Moreno, R.G.a.L.G., Removal of Mn, Fe, Ni and Cu Ions from Wastewater Using Cow Bone Charcoal **Materials** 2010. 3: p. 452-466.
- [41] Soltan, M.E. and Rashed, M.N., Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. **Advances in Environmental Research**, 2003. 7(2): p. 321-334.
- [42] Petru Bulai, E.-R.C., Iron removal from wastewater using chelating resin Purolite S930. **TEHNOMUS - New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies**: p. 63-68.
- [43] Aksu, Z., Çalik, A., Dursun, A.Y., and Demircan, Z., Biosorption of iron(III)–cyanide complex anions to *Rhizopus arrhizus*: application of adsorption isotherms. **Process Biochemistry**, 1999. 34(5): p. 483-491.

- [44] Tuzen, M., Uluozlu, O.D., Usta, C., and Soylak, M., Biosorption of copper(II), lead(II), iron(III) and cobalt(II) on *Bacillus sphaericus*-loaded Diaion SP-850 resin. **Analytica Chimica Acta**, 2007. 581(2): p. 241-246.
- [45] Selatnia, A., Boukazoula, A., Kechid, N., Bakhti, M.Z., and Chergui, A., Biosorption of Fe³⁺ from aqueous solution by a bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass. **Process Biochemistry**, 2004. 39(11): p. 1643-1651.
- [46] El-Chaghaby, N.T.A.-G.A.K.H.G.A., *Typha domingensis* leaf powder for decontamination of aluminium, iron, zinc and lead: Biosorption kinetics and equilibrium modeling. **Int. J. Environ. Sci. Tech**, 2009. 6(2): p. 243-248.
- [47] Chojnacka, K., Bioaccumulation of Cr(III) ions by Blue-Green alga *Spirulina* sp. Part I. A comparison with Biosorption. **American Journal of Agricultural and Biological Science**, 2007. 2(4): p. 218-223.
- [48] Chojnacka, K., Chojnacki, A., and Górecka, H., Biosorption of Cr³⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ ions by blue-green algae *Spirulina* sp.: kinetics, equilibrium and the mechanism of the process. **Chemosphere**, 2005. 59(1): p. 75-84.
- [49] Sidtitoon, N. **Removal of mercury, cadmium and lead by the use of selected microalgal strains** Master Science (Environmental Sanitation), Mahidol University, 2000.
- [50] Das, S., Biosorption of chromium and nickel by dried biomass of cyanobacterium *Oscillatoria laete-virens*. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES** 2012. 3(1).
- [51] Çelekli, A. and Bozkurt, H., Bio-sorption of cadmium and nickel ions using *Spirulina platensis*: Kinetic and equilibrium studies. **Desalination**, 2011. 275(1-3): p. 141-147.
- [52] Mata, Y.N., Blázquez, M.L., Ballester, A., González, F., and Muñoz, J.A., Characterization of the biosorption of cadmium, lead and copper with the brown alga *Fucus vesiculosus*. **Journal of Hazardous Materials**, 2008. 158(2-3): p. 316-323.
- [53] P. Kumar, C.M.R.a.A.K.K., Solvent Extraction and Spectrophotometric Determination of Pigments of Some Algal Species from the Shore of

- Puthumadam, Southeast Coast of India. **International Journal of Oceans and Oceanography**, 2010. 4(1): p. 29-34.
- [54] Parawee Thanomsup, N.T. Removal of heavy metal from industrial wastewater using algae that thrive in the cooling water system. in **Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON2015)** Bangkok, 2015.
- [55] William A. Hoffmann, H.P., Avoiding bias in calculations of relative growth rate. **Annals of botany**, 2002. 80: p. 37-42.
- [56] Özer, A., Özer, D., and Özer, A., The adsorption of copper(II) ions on to dehydrated wheat bran (DWB): determination of the equilibrium and thermodynamic parameters. **Process Biochemistry**, 2004. 39(12): p. 2183-2191.
- [57] Sarada, B., Prasad, M.K., Kumar, K.K., and Ramachandra Murthy, C.V., Cadmium removal by macro algae *Caulerpa fastigiata*: Characterization, kinetic, isotherm and thermodynamic studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2014. 2(3): p. 1533-1542.
- [58] Bankar, A.V., Kumar, A.R., and Zinjarde, S.S., Removal of chromium (VI) ions from aqueous solution by adsorption onto two marine isolates of *Yarrowia lipolytica*. **Journal of Hazardous Materials**, 2009. 170(1): p. 487-494.
- [59] Sheng, P.X., Yen-Peng, Ting, Chen J. Paul, Liang Hong, Sorption of lead, copper, cadmium, zinc and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms **Journal of Colloid and Interface Science** 2004. 275(1): p. 131-141.
- [60] Parawee Thanomsup, N.T. Removal of heavy metal from wastewater using dead algae. in **The 6th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 21st PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers**. Bangkok, 2015.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

สูตรการคำนวณ

ก.) สูตรการคำนวณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่อวันของสาหร่าย (Specific growth rate, μ)

$$\mu = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1}$$

เมื่อ μ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)

X_1 คือ น้ำหนักเปียกของสาหร่าย ณ เวลา t_1 (กรัม)

X_2 คือ น้ำหนักเปียกของสาหร่าย ณ เวลา t_2 (กรัม)

ข.) สูตรการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

$$\% \text{ Metal removal} = \left[\frac{C_f - C_i}{C_i} \right] \times 100$$

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักสุดท้ายที่เหลือในน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ค.) สูตรการคำนวณปริมาณโลหะหนักที่สาหร่ายดูดซับ (Metal uptake)

$$\text{Metal uptake} = \frac{V(C_i - C_f)}{S}$$

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักสุดท้ายที่เหลือในน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ (ลิตร)

S คือ ปริมาณตัวดูดซับ (กรัมน้ำหนักแห้ง)

ตารางแสดงผลการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบแห้ง

pH	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal		SD		Metal uptake	
			removal				(mg/g)	
			Fe	Ni	Fe	Ni	Fe	Ni
3	17.2	23.96	42.67	20.13	3.06	3.82	17.2	23.96
4	15.7	24.38	47.67	18.73	1.37	1.93	15.7	24.38
5	13.15	23.97	56.17	20.10	1.77	3.58	13.15	23.97
6	ตกตะกอน	20.29	-	32.37	-	1.72	-	20.29
7	ตกตะกอน	17.48	-	41.73	-	4.27	-	17.48

ตารางที่ ก.2 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบ
แห้ง

conc.(mg/L)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		SD	
			Fe	Ni	Fe	Ni
1.00	0.00	0.37	100.00	63.00	0.00	9.90
10.00	2.10	6.56	79.00	34.40	4.24	4.53
30.00	10.52	21.02	64.93	29.93	4.62	3.63
50.00	23.89	37.72	52.22	24.56	3.75	4.92
100.00	62.92	77.80	37.08	22.20	3.15	1.59

conc.(mg/L)	Metal uptake (mg/g)		SD	
	Fe	Ni	Fe	Ni
1.00	1.00	0.49	0.00	0.10
10.00	7.30	4.08	0.42	0.45
30.00	21.44	7.44	1.39	1.09
50.00	23.46	15.76	1.87	2.46
100.00	41.54	24.45	3.15	1.59

ตารางที่ ก.3 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่าย
แบบแห้ง

Dose(g/L)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		SD	
			Fe	Ni	Fe	Ni
0	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	10.52	27.05	64.93	9.83	1.89	2.52
2	11.51	27.95	61.63	6.83	1.53	1.53
3	2.49	25.16	91.70	16.13	2.03	1.46
4	2.26	24.28	92.47	19.07	0.73	0.66
5	3.09	23.53	89.70	21.57	1.11	2.24

Dose(g/L)	Metal uptake (mg/g)		SD	
	Fe	Ni	Fe	Ni
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	19.48	2.95	0.57	0.76
2	9.14	1.01	0.23	0.23
3	9.10	1.60	0.20	0.14
4	6.85	1.41	0.05	0.05
5	5.33	1.28	0.07	0.13

ตารางที่ ก.4 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยสาหร่ายแบบแห้ง

Time (min)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		SD	
			Fe	Ni	Fe	Ni
0	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	23.05	29.46	23.17	1.80	0.95	0.78
20	19.32	29.17	35.60	2.77	0.46	0.72
30	13.08	28.26	56.40	5.80	0.76	1.28
60(1h)	11.04	27.46	63.20	8.47	0.33	1.03
180(3h)	10.00	25.64	66.67	14.53	1.02	0.05
360(6h)	0.15	25.41	99.50	15.30	0.06	0.77
720(12h)	0.05	22.29	99.83	25.70	0.00	0.67
1440(24h)	0.05	20.01	99.83	33.30	0.00	0.13

Time (min)	Metal uptake (mg/g)		SD	
	Fe	Ni	Fe	Ni
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	6.95	0.54	0.95	0.78
20	10.68	0.83	0.46	0.72
30	16.92	1.74	0.76	1.28
60(1h)	18.96	2.54	0.33	1.03
180(3h)	20.00	4.36	1.02	0.05
360(6h)	29.85	4.59	0.06	0.77
720(12h)	29.95	7.71	0.00	0.67
1440(24h)	29.95	9.99	0.00	0.13

ตารางที่ ก.5 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงาน
ด้วยสาหร่ายแบบแห้ง

Time(h)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		Metal uptake (mg/g)	
			Fe	Ni	Fe	Ni
0	31.16	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00
1	5.62	0.80	81.96	68.75	25.54	1.76
3	6.29	0.76	79.81	70.31	24.87	1.80
6	5.39	0.71	82.70	72.27	25.77	1.85
12	5.70	0.49	81.71	80.86	25.46	2.07
24	2.66	0.37	91.46	85.55	28.50	2.19

ตารางที่ ก.6 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบสด

pH	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		SD	
			Fe	Ni	Fe	Ni
1	21.32	22.93	28.93	23.57	1.79	0.97
3	24.17	21.06	19.43	29.80	4.57	2.50
5	17.22	22.93	42.60	23.57	1.25	3.02
7	-	11.91	-	60.30	-	3.44

pH	Metal uptake (mg/g)		SD	
	Fe	Ni	Fe	Ni
1	32.63	26.58	2.02	1.09
3	24.86	38.12	5.85	3.20
5	47.16	26.09	1.38	3.34
7	-	115.96	-	6.62

ตารางที่ ก.7 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลด้วยสาหร่ายแบบสด

conc.(mg/L)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		SD	
			Fe	Ni	Fe	Ni
1	0.60	0.77	40.00	23.00	14.14	8.49
10	4.40	9.70	56.00	3.00	5.66	10.61
30	22.02	29.75	26.60	0.83	3.94	2.80
50	42.45	48.56	15.10	2.88	0.07	1.85
100	91.65	95.53	8.35	4.47	0.41	0.21

conc.(mg/L)	Metal uptake (mg/g)		SD	
	Fe	Ni	Fe	Ni
1	2.00	1.15	0.71	0.42
10	28.00	1.50	2.83	5.30
30	39.90	1.25	5.90	4.21
50	37.75	7.20	0.18	4.63
100	41.75	22.35	2.05	1.06

ตารางที่ ก.8 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์
ด้วยสาหร่ายแบบสด

Time (h)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		Metal uptake (mg/g)	
			Fe	Ni	Fe	Ni
0	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.05	7.42	99.83	75.27	149.75	112.90
12	0.00	3.32	100.00	88.93	150.00	133.40
24	0.00	0.54	100.00	98.20	150.00	147.30
48	0.00	0.00	100.00	100.00	150.00	150.00

ตารางที่ ก.9 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงาน
ด้วยสาหร่ายแบบสด

Time (h)	Fe(mg/L)	Ni(mg/L)	% Metal removal		Metal uptake (mg/g)	
			Fe	Ni	Fe	Ni
0	31.16	2.56	0.00	0.00	31.87	2.62
6	20.27	2.04	34.95	20.31	11.14	0.53
12	13.11	1.14	64.10	62.00	20.43	1.62
24	8.47	0.87	76.08	70.09	24.25	1.84
48	3.61	0.12	90.42	96.13	28.82	2.52

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปารวีย์ ฌนอมทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2533 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสารวิทยา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

