| | |
|---|---|
| **ชื่อโครงการวิจัย** | การดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ทางชีวภาพโดย *Anabaena* sp. ในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา |
| **หน่วยงาน** | มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา |
| **ชื่อผู้วิจัย** | นายปริญญา ทับเที่ยง<br>นายสอแหละ บางูสัน<br>นางสาวฤทัยทิพ อโนมุณี |
| **เดือนและปีที่ทำวิจัยสำเร็จ** | 2560 |

## บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม จากน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยใช้สาหร่าย *Anabaena* sp. โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของน้ำทิ้ง ได้แก่ ความขุ่น อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรดด่าง บีโอดี ซีโอดี ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (TSS) ปริมาณตะกั่ว และปริมาณแคดเมียม พบว่าในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา มีค่าเท่ากับ 12.8±0.40 NTU 29.16±0.28 องศาเซลเซียส 501±31 mS/cm 7.24±0.01 (พีเอช) 120±60 มิลลิกรัมต่อลิตร 256±32 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.75±0.16 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.0083±0.0010 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.0032±0.0004 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่าย ได้แก่สูตรอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความเข้มแสง และระยะเวลา ผลการศึกษา พบว่าสูตรสูตรอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความเข้มแสง และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย คือ BG-11 7.0 30 องศาเซลเซียส 3,000 ลักซ์ และ 15 วัน ตามลำดับ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาการดูดซับ และปริมาณสาหร่าย ผลการศึกษา พบว่า ความเป็นกรดด่าง ระยะเวลา และปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว คือ 5.0 150 นาที และ 0.1 กรัม ตามลำดับ สำหรับแคดเมียม คือ 5.0 90 นาที และ 0.1 กรัม ตามลำดับ เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมมาหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ตามสมการการดูดซับของแลงค์เมียร์ และฟรุนดิช พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมสอดคล้องกับสมการของแลงค์เมียร์ที่ $R^2$ เท่ากับ 0.9827 และ 0.6047 ค่าความสามารถดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมได้สูงสุดเท่ากับ 28.60 และ 25.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และจากการทดลองนำสาหร่ายมากำจัดตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้ง พบว่า สามารถลดปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาได้ 0.0074 และ 0.0031 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 83.18 และ 78.81

เลข Bibid 114447
วันที่ 21 ม.ค. 2561
เลขเรียกหนังสือ 363.7394 ป171 ก

**Research Title** Biosorption of Lead and Cadmium by *Anabaena* sp. In Effluent from Science Center Rajabhat Songkhla University

**Institution** Rajabhat Songkhla University

**Researcher** Mr. Parinya Thubthaing
Mr. Solhae Bangusan
Ms. Ruethaithip Anomunee

**Academic Year** 2017

## Abstract

The objective of this research was to study the adsorption efficiency of lead and cadmium from wastewater at Science Center, Songkhla Rajabhat University by *Anabaena* sp. Physical and chemical characteristics of wastewater were investigated, including turbidity, temperature, conductivity, pH, biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solid (TSS), and the quantity of lead and cadmium. It was found that the physical and chemical characteristics of the wastewater from Science Center, Songkhla Rajabhat University were as follows: 12.8±0.360 NTU (turbidity), 29.16±0.28°C (temperature), 501±31.17 mS/cm (conductivity), 7.24±0.005 (pH), 120±60 mg/l (BOD), 256±32 mg/l (COD), 0.75±0.16 mg/l (TSS), and 0.0083±0.0010 mg/l and 0.0032±0.0004 mg/l (the quantity of lead and cadmium, respectively). Optimal conditions for algal growth, including medium formulation, pH, temperature, light intensity, and time, were also determined. The results showed that the medium formulation, pH, temperature, light intensity, and time for the growth of algae were BG-11, pH 7.0, 30°C, 3000 lux, and 15 days, respectively. The optimal conditions for lead and cadmium adsorption, including, pH, time, and appropriate quantity of algae, were also evaluated. It was observed that the pH, time, and appropriate quantity of algae for lead adsorption was pH 5.0, 150 minutes, and 0.1 gram, respectively, and for cadmium adsorption was pH 5.0, 90 minutes, and 0.1 gram, respectively. When using this optimal conditions to detect the maximum capacity of lead and cadmium adsorption following Langmuir and Freundich's adsorption equation, the isotherm of lead and cadmium adsorption corresponds to the Langmuir's equation ($R^2$ = 0.9827 and 0.6047 for lead and cadmium adsorption, respectively). The maximum capacity of lead and cadmium adsorption was 28.60 and 25.76 mg/g, respectively. It was found that using *Anabaena*

sp. for removal of lead and cadmium from wastewater could reduce the amount of lead and cadmium in wastewater from Science Center, Songkhla Rajabhat University to 0.0074 and 0.0031 mg /l, respectively, which was relevant to 83.18% and 78.81%, respectively.

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ทางชีวภาพ โดย *Anabaena* sp. ในน้ำทิ้ง ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยกองทุนพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา งบประมาณวิจัยประจำปีการศึกษา 2555 เป็นจำนวนเงิน 60,000 บาท (หกหมื่นบาทถ้วน) ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่ ให้ใช้ห้องปฏิบัติการ วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือ ในการทำวิจัย นางสาวสุไวดา สัสดี นางสาวอาซือนะ บูเก๊ะเจ๊ะลี นักวิทยาศาสตร์โปรแกรมวิชาชีววิทยาและชีววิทยาประยุกต์ ให้ความอนุเคราะห์ในการช่วยเตรียมอาหารเลี้ยงสาหร่าย

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์โปรแกรมวิชาเคมี และโปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่คอยช่วยเหลือ แนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี

ปริญญา ทับเที่ยง
สอแหละ บางูสัน
ฤทัยทิพ อโนมุณี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มิถุนายน 2560

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ง |
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (3) |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 1 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | 3 |
| ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับน้ำเสีย | 3 |
| โลหะหนัก | 5 |
| กระบวนการบำบัดน้ำเสีย | 8 |
| การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ | 8 |
| สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน | 10 |
| การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในการกำจัดโลหะหนัก | 15 |
| ไอโซเทอมของการดูดซับทางชีวภาพ | 16 |
| บทที่ 3 การทดลอง | 21 |
| อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการ | 21 |
| วิธีการดำเนินการ | 21 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล | 27 |
| สมบัติทางกายภาพบางประการในน้ำทิ้ง | 27 |
| สมบัติทางเคมีบางประการในน้ำทิ้ง | 27 |
| ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Anabaena* sp. | 28 |
| ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม | 31 |
| ผลการศึกษาประสิทธิภาพของ *Anabaena* sp. ในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้ง | 35 |
| ผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม | 35 |
| ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม | 36 |


มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ | 37 |
| บรรณานุกรม | 50 |
| ภาคผนวก | 54 |


มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | หน้า |
|---|---|
| 3-1 แสดงวิธีการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำใช้ในการวิเคราะห์ | 21 |
| 3-2 วิธีการวิเคราะห์ | 22 |
| 4-1 ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพบางประการในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา | 27 |
| 4-2 ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางเคมีบางประการในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา | 28 |


มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่ 2-1 ลักษณะทั่วไปของสาหร่าย *Anabaena* sp. 14
ภาพที่ 2-2 แบบจำลอง Langmuir isotherm 17
ภาพที่ 2-3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir 17
ภาพที่ 2-4 แบบจำลอง Freundlich isotherm 18
ภาพที่ 2-5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich 19
ภาพที่ 4-1 แสดงผลของสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. 28
ภาพที่ 4-2 แสดงผลของพีเอชต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. 29
ภาพที่ 4-3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp 30
ภาพที่ 4-4 แสดงผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. 30
ภาพที่ 4-5 แสดงผลของระยะเวลาต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. 31
ภาพที่ 4-6 ปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ค่าความเป็นกรดด่างต่าง ๆ 32
ภาพที่ 4-7 เปอร์เซ็นต์ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ค่าความเป็นกรดด่างต่าง ๆ 32
ภาพที่ 4-8 ปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ 33
ภาพที่ 4-9 เปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ 33
ภาพที่ 4-10 ปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ปริมาณสาหร่ายต่าง ๆ 34
ภาพที่ 4-11 เปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ปริมาณสาหร่ายต่าง ๆ 34
ภาพที่ 4-12 ปริมาณตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำทิ้ง ก่อน-หลัง การดูดซับโดยสาหร่าย *Anabaena* sp. 35
ภาพที่ 4-13 ปริมาณการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 35
ภาพที่ 4-14 ปริมาณการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 36

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญ

มลพิษโลหะหนักเป็นปัญหาสำคัญของสิ่งแวดล้อมที่พบได้ทั่วไป เกิดจากการปล่อยน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ จากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเหมืองแร่ โรงไฟฟ้า การผลิตแบตเตอรี่ โรงงานสิ่งทอ โรงกลั่นน้ำมันและปิโตรเคมี ยาฆ่าแมลงและสารเคมี ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โลหะหนักจะไม่ย่อยสลายและมีแนวโน้มที่จะสะสมในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำนั้นและมีการถ่ายโอนไปยังผู้บริโภครวมทั้งมนุษย์และนำไปสู่โรคต่างๆและความผิดปกติตามมา เช่นโรคมินามาตะจากพิษปรอท และโรคอิไต-อิไตจากพิษแคดเมียม การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี การกรอง รีเวิร์สออสโมซิส แต่วิธีการดังกล่าวจะมีค่าใช้จ่ายที่สูง การดูดซับทางชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา ยีสต์ สาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายขนาดใหญ่ หรืออาจจะเป็นพืชน้ำซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายต่ำ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิด *Anabaena* sp. เป็นสาหร่ายขนาดเล็กที่สามารถเพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณมากก็จะมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ถ้าสามารถนำสาหร่ายชนิดนี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ก็จะเป็นการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายที่มีมากมายได้อย่างเหมาะสม Katircioglu และคณะ(2008) ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียมโดยใช้สาหร่าย *Oscillatoria* sp. ที่แยกได้จากน้ำจืด Naddafi และคณะ (2007) ได้ศึกษาการดูดซับทางชีวภาพของ ตะกั่วและแคดเมียมโดยชีวมวล *Sargassum glaucescens*

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีในน้ำทิ้ง สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Anabaena sp.* และประสิทธิภาพของ *Anabaena* sp. ในการดูดซับโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียม จากน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเป็นแนวทางในการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ในน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ของ *Anabaena* sp.
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ *Anabaena* sp. ในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

**1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ทราบถึงปริมาณสารโลหะหนัก ตะกั่ว และแคดเมียม รวมทั้งค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อุณหภูมิ (Temperature) ค่า BOD (Biochemical Oxygen Demand) COD (Chemical Oxygen Demand) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด (TSS: Total Suspended Solids) และความขุ่น (Turbidity) จากน้ำทิ้ง จากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมผลต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ของ *Anabaena* sp.

3. ทราบถึงประสิทธิภาพของ *Anabaena* sp.ในการลดปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# บทที่ 2

# ทฤษฎี

## 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับน้ำเสีย

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น น้ำใช้จากอาคารบ้านเรือน จากกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม ดังนั้นจะเห็นว่าน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ จากกิจกรรมต่างกันจะมีลักษณะต่างกัน การศึกษาเกี่ยวกับน้ำเสีย เช่น ปริมาณน้ำเสีย ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ระบบรวบรวมและบำบัดน้ำเสีย (ศิริพร หงส์พันธุ์ และคณะ, 2545)

### 2.1.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

1. น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากอาคารบ้านเรือนและกิจกรรมต่างๆที่เกิดในชุมชน เช่น โรงแรม ตลาด และสถานบริการต่างๆ ในกรณีที่ชุมชนไม่มีระบบระบายน้ำทิ้งน้ำเหล่านั้นก็จะไหลลงสู่แหลงรองรับตามธรรมชาติ เช่น ที่ลุ่ม ทุ่งนา และแม่น้ำ ซึ่งจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนแหล่งน้ำผิวดิน

2. น้ำเสียจากอุตสาหกรรม หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกขบวนการต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกขนาด และจะระบายน้ำเสียลงสู่แม่น้ำโดยไม่ได้ผ่านการบำบัดอย่างจริงจัง เช่น โรงงานผลิตอาหาร เครื่องหนัง น้ำมัน ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงเนื่องจากน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูง

3. น้ำเสียจากการเกษตร หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการดำเนินงานภาคเกษตรกรรมประเภทต่างๆ การใช้ปุ๋ยหรือสารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชมากเกินไปทำให้สารเหล่านี้ไหลลงสู่แหล่งน้ำ การจับปลาด้วยสารพิษก็เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเป็นสาเหตุประการหนึ่งของภาวะมลพิษทางน้ำ

### 2.1.2 ปริมาณน้ำเสีย

เป็นข้อมูลที่สำคัญมากในการออกแบบระบบรวบรวมและบำบัดน้ำเสีย ข้อมูลปริมาณน้ำเสียสามารถหาได้จาก

1. การประมาณจากอัตราการใช้น้ำ จากน้ำประปาและจากแหล่งน้ำอื่นๆ เช่นน้ำบาดาล บ่อน้ำตื้น แหล่งน้ำผิวดิน น้ำฝน เป็นต้น

2. การวัดอัตราการไหลใช้เครื่องมือที่เรียกว่า กล่องน้ำล้น (WeirBox) ในการหาปริมาณน้ำเสียของชุมชนจำเป็นต้องใช้ข้อมูลทั้ง 2 วิธี ประกอบกันรวมทั้งเปรียบเทียบกับอัตราการใช้น้ำจากชุมชนอื่น ๆ ส่วนปริมาณน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถประมาณจากปริมาณการใช้น้ำของโรงงาน ซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทหรือชนิดของโรงงาน

**2.1.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย**

องค์ประกอบที่ทำให้น้ำเสีย มีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากน้ำปกตินั้น โดยทั่วไปจะถูกปนเปื้อนจากสิ่งเหล่านี้คือ (ศิริพร หงส์พันธุ์ และคณะ, 2545)

1. สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษอาหาร ผัก ผลไม้ ชิ้นเนื้อ ซึ่งสามารถย่อยโดยจุลินทรีย์ ทำให้ระดับการละลายของออกซิเจนในน้ำลดลง ปริมาณสารอินทรีย์นิยมวัดโดยใช้ค่า บีโอดี (BOD) เมื่อมีค่าบีโอดีในน้ำสูงแสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่เป็นจำนวนมากจะทำให้น้ำเน่าเสียง่าย

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ ที่อาจไม่ทำให้น้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อถูกปนเปื้อน เป็นอุปสรรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา ได้แก่ คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ เป็นต้น

3. โลหะหนักและสารพิษต่างๆ อาจอยู่ในรูปสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ก็ได้ สารเหล่านี้จะสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร และเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท แคดเมียม ทองแดง สารเคมีปราบศัตรูพืช และสัตว์ต่างๆ

4. น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ สารเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสงและกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ นอกจากนั้นยังเกิดสภาพที่ไม่น่าดูและอาจเกิดอัคคีภัยได้

5. ความร้อน ทำให้เกิดการแบ่งชั้น (Stratification) ของลำน้ำ เร่งปฏิกิริยาการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ และลดระดับการละลายในน้ำของออกซิเจน อาจทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น อุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมควรอยู่ประมาณ 25-35 องศาเซลเซียส

6. ของแข็ง ประกอบด้วยสารแขวนลอย (Suspended Solids) ตะกอนหนัก (Settleable Solids) และของแข็งละลาย (Dissolve Solids) ซึ่งเมื่อจมอยู่ก้นน้ำจะทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนในน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง มีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำและการนำไปใช้ประโยชน์ของมนุษย์

7. สีและความขุ่น มักเกิดจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ กระดาษ ฟอกหนังและโรงค่าสัตว์ สีและความขุ่นจะขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงในน้ำ

8. กรดและด่าง วัดโดยค่าพีเอช (pH) น้ำสะอาดจะมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งถือว่าเป็นค่าพีเอชที่เป็นกลาง หากพีเอชน้อยกว่า 7 ถือว่าเป็นกรด และหากพีเอช มากกว่า 7 ถือว่าเป็นด่าง ค่าพีเอช มีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำและการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ ค่าพีเอชของน้ำทิ้งต้องมีค่าประมาณ 5 ถึง9 (pH 5-9)

9. การเกิดฟองและสารซักฟอก ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ฟอง จะขัดขวางการกระจายออกซิเจนในอากาศลงสู่น้ำและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ รวมทั้งพืชน้ำเจริญเติบโตและแพร่ขยายเร็วเป็นตัวขวางกั้นการจราจรทางน้ำ

10. จุลินทรีย์ จุลินทรีย์ในน้ำเสียแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ จุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogenic Microorganism) และจุลินทรีย์ที่ไม่ก่อโรค (Non- Pathogenic Microorganism) พวกที่ก่อโรคจะปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุจจาระ ขยะติดเชื้อ หรือซากสัตว์ที่ติดเชื้อ ซึ่งจะเป็นอันตราย ต่อคน

และสัตว์ที่สัมผัสกับน้ำเสีย ส่วนพวกที่ไม่ก่อโรคจะดึงเอาออกซิเจนที่ละลายน้ำไปใช้ ทำให้ออกซิเจนละลายน้ำลดลง

11. สารกัมมันตภาพรังสี อาจมาจากโรงพยาบาล หรือองค์กรของรัฐบางประเภทเป็นสารอันตรายเมื่อสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิต ก่อให้เกิดมะเร็งได้

12. ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) ซึ่งจะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำต่ำลงเกิดวัชพืชในน้ำ เป็นปัญหาในกระบวนการผลิตน้ำประปา

13. กลิ่น เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน กลิ่นจะเป็นตัวเสริมภาพลักษณ์ของน้ำเสียให้เลวลงยิ่งขึ้น

### 2.1.4 ระบบรวบรวมน้ำเสีย

ระบบรวบรวมน้ำเสียหรือระบบละลายน้ำ หมายถึง การนำน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดหลายแห่งไปรวมกันยังสถานที่ที่จะบำบัดโดยผ่านระบบระบายน้ำ ซึ่งแบ่งเป็น 2 รูปแบบ (ศิริพร หงส์พันธุ์ และคณะ, 2545)

1. ระบบท่อรวม (Combine System) เป็นระบบที่ใช้ระบายน้ำฝนและน้ำเสีย โดยอาศัยท่อเดียวกัน โดยมากจะระบายน้ำเสียลงสู่คลอง ซึ่งระบบนี้จะต้องสร้างท่อดักน้ำเสีย (Interceptor) เพื่อรวบรวมน้ำเสียไปยังบ่อบำบัดน้ำเสีย

2. ระบบท่อแยก (Separated System) เป็นระบบที่แยกท่อระบายน้ำเสียออกจากท่อระบายน้ำฝน

## 2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 เท่าตัวขึ้นไป (สุวัจนา ถังมณี,2545) ตัวอย่างของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท สังกะสี เป็นต้น โลหะหนักจำพวกนี้มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสมและตกค้างอยู่ในธรรมชาติได้นาน ประกอบกับโลหะหนักมีสมบัติเป็นประจุบวก มีความสามารถยึดติดกับตะกอนดินซึ่งเป็นประจุลบ และเมื่อโลหะหนักปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ จึงเป็นสาเหตุสำคัญทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำได้รับโลหะหนัก และยังถ่ายทอดไปยังห่วงโซ่อาหาร เมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายก็จะก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง เช่น โรคมะเร็ง เป็นต้น

### 2.2.1 ตะกั่ว

เป็นโลหะหนักในธรรมชาติอยู่ในรูปของแร่กาลีนา คีรูไซต์ และแอนกลีไซต์ ตะกั่วบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของแข็ง สีเทาปนขาว สามารถแปรรูปได้โดยการทุบ รีด หล่อหลอมได้ง่าย สามารถผสมเข้ากับโลหะต่างๆ ได้ดี รวมทั้งการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเกลือของตะกั่วต่างๆ ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่ การดูดซึมจากระบบทางเดินอาหาร คือ การปนเปื้อนของตะกั่วในอาหาร น้ำ เครื่องดื่ม ยาสมุนไพรแผนโบราณและภาชนะเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อน พบว่าร้อยละ 70-85 ของตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายคนปกติได้จากอาหาร การดูดซึมจากระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาควันหรือฟูมของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น จากการหลอมตะกั่ว หรือเชื่อมโลหะ ซึ่งเป็นทางเข้าสู่

ร่างกายอันดับแรกของผู้ประกอบอาชีพที่สัมผัสตะกั่วเช่นคนงานในโรงงานหลอมตะกั่วแบตเตอรี่ โรงงานผลิตสีฯ และการดูดซึมทางผิวหนัง ณรงค์ศักดิ์ และคณะ, (2554)

1. การใช้ประโยชน์ของตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติเด่น คือ ความหนาแน่นสูง จุดหลอมเหลวต่ำ มีความอ่อนตัวสูง มีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่น และต้านทานการผุกร่อนได้ดี ตะกั่วจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ทั้งในสภาพที่เป็นโลหะและสารเคมี เช่น ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่สำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์ ใช้หุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าและสายสื่อสาร ใช้ทำลูกกระสุนและยุทธภัณฑ์ ใช้เป็นสารประกอบตะกั่วสำหรับผสมสีป้องกันสนิม เป็นโลหะที่ใช้ผสมกับโลหะทองแดงและเหล็กเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการกลึงหรือตัด ใช้ทำโลหะบัดกรี ใช้เป็นโลหะตัวพิมพ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น ตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำเป็นฉากเพื่อป้องกันรังสีต่างๆ ด้วย เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีเบต้า รังสีแกมมา เป็นต้นน้องจากนั้นตะกั่วอาร์ซีเนต (Lead Arsenate) ยังถูกนำมาใช้ในด้านการเกษตร เป็นสารฆ่าแมลง (Francis, 2004 อ้างโดย นันทวรรณ อุ่นจางวาง,2557)

2. ความเป็นพิษ สำหรับบุคคลทั่วไปตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง คือ ทางการหายใจโดยเฉพาะจากไอเสียรถยนต์ และการกินอาหารที่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว สำหรับบุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่ว ตะกั่วจะสามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ทางผิวหนังด้วย ซึ่งตะกั่วอินทรีย์ถูกดูดซึมเข้าผิวหนังได้ดี ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดอาการเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน จะมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อ่อนเพลีย คลื่นไส้ อุจจาระมีสีดำ ตื่นเต้นง่าย ความจำเสื่อม และมีอาการกระตุกของกล้ามเนื้อประสาท แต่ถ้าหากร่างกายได้รับตะกั่วในปริมาณน้อยเป็นเวลานานทำให้เกิดอาการเป็นพิษเรื้อรัง หลังจากได้รับสารตะกั่วทีละน้อยเข้าสู่ร่างกายจนถึงระยะเวลาหนึ่งอาจนานเป็นปีจึงแสดงอาการ ส่วนมากเกิดกับบุคคลที่มีอาชีพที่สัมผัสตะกั่ว ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิต ไปจับกับเม็ดเลือดแดงแทนที่เหล็ก ($Fe^{2+}$) ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็นในการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดอาการโลหิตจาง (Anaemia) และมีผลให้ปริมาณเหล็กในน้ำเหลืองเพิ่มขึ้นผิดปกติ ตะกั่วบางส่วนไปสะสมในกระดูก ตะกั่ว ($Pb^{2+}$) จะเข้าไปแทนที่ แคลเซียม ($Ca^{2+}$) ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็นในการสร้างกระดูก และฟัน ทำให้มีอาการปวดตามข้อ กระดูกผุ และหักง่าย ถ้าไปสะสมที่รากฟัน ทำให้เห็นสีม่วง หรือดำบริเวณเหงือก บางครั้งเรียกว่า เส้นตะกั่ว (Lead Line) ฟันหลุดได้ง่าย นอกจากนี้ตะกั่วยังสามารถสะสมในไขมัน ระบบประสาท สมอง ระบบน้ำเหลือง ตับ และ ไต อาการพิษเรื้อรังที่พบบ่อย คืออาการระบบย่อยอาหาร จะเกิดการปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก อาการพิษทางประสาท และสมอง ทำให้ทรงตัวไม่อยู่ เกิดอาการประสาทหลอน ซึมไม่รู้สึกตัว มือและเท้าตก เป็นอัมพาต สลบ และอาจตายได้

พิษของตะกั่วที่มีต่อสัตว์น้ำโดยเฉพาะปลา ตะกั่วทำให้การเจริญเติบโตของปลาลดลง เมื่อตะกั่วเข้าไปสะสมในร่างกายของปลา ทำให้ระบบต่างๆ ในร่างกายเสื่อมลง เซลล์เยื่อบุผิวหนังและเหงือกถูกทำลาย ตะกั่วไปจับกับเมือกสะสมบริเวณเหงือกของปลา ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดลง หากได้รับตะกั่วเป็นเวลานานอาจทำให้ตายได้ (นันทวรรณ อุ่นจางวาง ,2557)

**2.2.2 แคดเมียม**

เป็นโลหะหนักที่สามารถระเหิดเป็นไอด้วยความร้อนได้ง่าย แคดเมียมเป็นธาตุที่ค่อนข้างหาได้ยากและมีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนที่พบเป็นปริมาณมากมักเกิดปนอยู่กับแร่สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง และดีบุก ในธรรมชาติมักจะรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีสีเหลืองอยู่ในแร่ Grunockite และมักปนอยู่กับแร่สังกะสีซัลไฟด์ ในโรงงานถลุงสังกะสีพบว่าแคดเมียมเป็นผลพลอยได้เนื่องจากมีแคดเมียมปะปนอยู่ในแร่ที่นำมาถลุง แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่ใช้ทำหลอดไฟ หัวเจาะ หัวโม่อุตสาหกรรมผลิตแก้ว สี ปุ๋ย แบตเตอรี่ เชื่อมโลหะ ใช้ผสมกับซีลีเนียมในการผลิตสี ผสมในน้ำมันเครื่อง ยางและพลาสติก ซึ่งแคดเมียมที่เข้าไปอยู่ในสภาวะแวดล้อมมีแหล่งกำเนิดมาจากหลายแหล่งด้วยกัน เช่น แคดเมียมในอากาศมีแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานถลุงสังกะสี ตะกั่วและทองแดง จากการเผาไหม้ของพลาสติก สีชนิดต่างๆ นิเกิล-แคดเมียมแบตเตอรี่ น้ำมันเครื่อง ผลิตภัณฑ์ยาง และควันบุหรี่ ส่วนในแหล่งน้ำเกิดจากการระบายน้ำเสียจากโรงงานบางประเภทสู่แม่น้ำลำคลอง เช่นโรงงานทำโลหะผสม ชุบโลหะและจากการละลายเหล็กที่เคลือบด้วยสังกะสีที่มีแคดเมียมปนอยู่ นอกจากนี้ยังมีการนำโลหะแคดเมียมมาใช้แทนอะลูมิเนียม เหล็กสแตนเลสและสังกะสีในการฉาบอุปกรณ์ที่เป็นโลหะต่างๆอีกด้วย สุกัญญา, (2543)

ความเป็นพิษ การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษฉับพลันได้ แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน โรคที่เกิดอาจแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1. โรคปอดเรื้อรัง การได้รับแคดเมียมนานๆ และในปริมาณมากโดยเฉพาะจากการหายใจจะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ซึ่งเป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดลม มีพังผืดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมากคือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

2. โรคไตอักเสบ จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไตซึ่งจะพบแคดเมียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสียการทำงาน พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไตก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็นไตวายได้ ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร แม้ว่าจะไม่ได้รับแคดเมียมต่อไปแล้ว แต่ไตก็ยังไม่สามารถฟื้นคืนกลับมาดังเดิมได้

3. โรคกระดูก แคดเมียมทำให้เกิดการสูญเสียแคลเซียมออกมาในปัสสาวะสูง และอาจมีแคดเมียมเข้าไปสะสมในกระดูกทำให้กระดูกพรุน และมีอาการปวดกระดูกอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาการปวดกระดูกสะโพก เช่นที่เกิดกับชาวญี่ปุ่นที่เมืองฟูซู ในช่วงก่อนและระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งเรียกโรคนี้ว่า อิไตอิไต (Itai Itai) หรือ เอาช์ เอาช์ (Ouch Ouch) ชื่อโรคมาจากเสียงร้องอย่างเจ็บปวดในภาษาญี่ปุ่น ซึ่งได้รับแคดเมียมมากเป็นเวลานานจากการกินข้าวที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียมมาก คนกลุ่มนี้จะมีกระดูกเปราะ แตกหักง่าย และอาจมีความสูงลดลงได้ เพราะการสูญเสียแคลเซียมทำให้เป็นโรคกระดูกพรุน

4. โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจ พบว่าแคดเมียมทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้นมากและมีโอกาสเป็นโรคหัวใจสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นการร่วมกันกับโรคไตดังที่กล่าวมาแล้ว

5. โรคมะเร็ง มีข้อมูลการศึกษาติดตามคนงานที่ทำงานสัมผัสกับแคดเมียม เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่แห้งขนาดเล็ก พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งปอด สูงกว่าคนทั่วไปและอาจมีผลต่อการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งของต่อมลูกหมากด้วย

## 2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย จะมีหลายวิธีและหลายกระบวนการ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยทั้งความรู้ทางชีวเคมี ทางจุลชีววิทยา ทางเคมี และทางกายภาพ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทางกายภาพ (Physical Unit Operation) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมักจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การบดตัด (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) การกำจัดตะกอนหนัก (Grit Removal) เป็นต้น

2. กระบวนการทางเคมี (Chemical Unit Processes) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามวลสารต่างๆออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

3. กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Unit Processes ) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลชีพที่จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศและจะได้จุลชีพเพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ Activated Sludge, Trickling Filter, Aerated Lagoon, Anaerobic Filter, Anaerobic Pond , Stabilization Pond เป็นต้น

4. กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical Unit Processes ) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีรวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ Ion Exchange, Carbon Adsorption, Reverse Osmosis, Electrodialysis เป็นต้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

## 2.4 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ

### 2.4.1 หลักการของการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ

การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) หมายถึง การดูดซับโลหะหนักด้วยมวลชีวภาพ ซึ่งเป็นการกระทำทางเคมี ฟิสิกส์ ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนัก/กลุ่มโลหะหนักที่มีประจุกับเซลล์จุลินทรีย์ เป็นวิธีทางชีวภาพในการควบคุมสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน มีข้อดีกว่าวิธีดั้งเดิมในด้านค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ กากตะกอนที่เกิดจากวิธีทางเคมี/ชีวภาพ การเพิ่มสารอาหาร และสารดูดซับชีวภาพ(Biosorbent) สามารถนำไปผ่านกระบวนการแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้และโลหะยังสามารถเอาออกมาจากสารดูดซับนั้นได้

กระบวนการดูดซับทางชีวภาพเกี่ยวข้องกับวัฏภาคของของแข็ง คือ สารดูดซับที่เป็นวัสดุชีวภาพและวัฏภาคของของเหลว (ตัวทำละลายที่ใช้โดยทั่วไปคือ น้ำ) ที่มีกลุ่มของตัวที่จะถูกดูดซับอยู่ สารซอร์เบต (Sorbate) โลหะที่มีประจุ เป็นแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับกับกลุ่มของตัวถูกดูดซับที่กระทำต่อกันและยึดติดด้วยกลไกที่แตกต่างกัน กระบวนการดูดซับจะดำเนินต่อเนื่องจนถึงจุดสมดุลระหว่างปริมาณกลุ่มโลหะที่ยึดติดกับสารดูดซับกับส่วนที่เหลืออยู่ในสารละลาย การที่มีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายมาก แต่ไม่มีตำแหน่งหรือจุดที่จะจับกับอนุภาคของสารดูดซับเป็นการเกิดความไม่สมดุลระหว่างกระบวนการที่สร้างแรงผลักดันสำหรับกลุ่มตัวละลาย (โลหะ) โลหะหนักจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของมวลชีวภาพ (Biomass) ซึ่งเป็นสารดูดซับชีวภาพซึ่งมีประจุของโลหะอยู่ในสารละลาย (Sorbate) จำนวนมาก การศึกษาความสมดุลระหว่างสารดูดซับชีวภาพและโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายนั้นศึกษาได้จากความจุของสารดูดซับชีวภาพ ซึ่งสามารถอธิบายด้วย Adsorption Isotherm ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับปริมาณที่เหลืออยู่ในสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุลโดยประสิทธิภาพของการดูดซับสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองของ Freundlich and Langmuir isotherm

### 2.4.2 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ

โลหะหนักสามารถจับกับจุลชีพหรือจุลินทรีย์ที่มีชีวิตด้วยกลไกต่างๆ กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับชีวภาพนี้มีการจำแนกโดยใช้เกณฑ์ เช่น กลไกที่จัดอยู่บนพื้นฐานเมแทบอลิซึมของเซลล์จำแนกได้เป็นกลไกที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับกระบวนการสร้างและสลาย (Metabolism) หรือกลไกที่อยู่บนพื้นฐานของกลุ่มที่ถูกดูดซับซึ่งจัดว่าเป็นการสะสมในเซลล์/การตกตะกอนนอกเซลล์ (intracellular Accumulation /Extracellular Precipitation) การสะสม/การตกตะกอนบนผิวหน้าเซลล์ (Cell Surface Sorption/Precipitation) การสะสมภายในเซลล์(Intracellular accumulation) ไอออนที่ถูกดูดซับจะถูกส่งผ่านเยื่อ (Membrane) เช่นเดียวกับกลไกการรับ-ส่งไอออนของโพแทสเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมผ่าน Membrane การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยจุลินทรีย์ เช่น การเกิดออกซิไดซ์ การรีดิวซ์ การเติม หรือ เอาออกของหมู่เมทิล โดยโลหะหนักจะยึดจับกับจุลินทรีย์ด้วยสารเชิงซ้อนนอกเซลล์ (Extracellular Complexation) ซึ่งกลไกที่เกี่ยวข้องของการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ ประกอบด้วย

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการกระทำทางไฟฟ้าสถิต (electrostatatic interaction) เช่น การดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดยแบคทีเรีย *Zooglea ramigera* และสาหร่าย *Chorella vulgaris*

2. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ได้แก่ การดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดยรา *Ganoderma lucidium* และ *Asperigillus niger*

3. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) ได้แก่ การดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดย *Zooglea ramigera* และ *Chorella vulgaris* ที่เกิดขึ้นโดยการผ่านการดูดซับและการเกิดพันธะโคออร์ดิเนต ระหว่างโลหะกับหมู่อะมิโน (Amino) หรือ หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ของผนังเซลล์ กลไกที่กล่าวมาแล้วนี้อาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

## 2.5 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน หรือ Cyanobacteria หรือ Blue-green algae จัดอยู่ใน Division Cyanophyta เป็นสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำจำพวกโปรคาริโอต (Prokaryote) ที่มีขนาดเล็กสามารถสังเคราะห์แสงได้เช่นเดียวกับพืชชั้นสูง แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ทั่วไปทุกสภาพทั้งในน้ำจืดและน้ำทะเล บนบก อากาศ ภูมิอากาศทั้งเขตร้อนและเขตหนาว สภาพที่อยู่ในน้ำอาจอยู่แบบอิสระหรือเกาะติดกับวัตถุอื่นจมในน้ำ บางชนิดอยู่ภายในพืชเป็นแบบเอนโดไฟต์ (Endophyte) เช่น การเจริญในพืช *Blasia* และ *Antheceros* ซึ่งอยู่ในกลุ่ม Liverworts สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena* บางชนิดอาจอยู่ในเฟิร์นน้ำหรือในรากของ *Cycads* การอยู่รวมกันของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น เช่น *Anabaena azollae* ในแหนแดงทำให้เกิดการตรึงไนโตรเจน ($N_2$-fixation) การตรึงไนโตรเจนเกิดขึ้นได้ทั่วไปทั้งในดิน น้ำจืด และน้ำทะเล การตรึงไนโตรเจนให้แก่ดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ (เสาวนิตย์ ชอบบุญ และพัชรี หลุ่งหม่าน, 2551)

### 2.5.1 ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน หรือ Cyanobacteria หรือ Blue-green algae เป็นพืชชั้นต่ำที่เรียกว่า โปรคารีโอต (Procaryote) ซึ่งจัดรวมอยู่ในพวกเดียวกับแบคทีเรีย แต่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป คือ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีคลอโรฟิลล์ เอ จึงสามารถสังเคราะห์แสงได้ และมีออกซิเจนซึ่งเกิดขึ้นจากการสังเคราะห์แสงด้วย ซึ่งคุณสมบัตินี้จะไม่พบในพวกแบคทีเรีย สาหร่ายกลุ่มนี้ไม่มีการสืบพันธุ์แบบมีเพศ สามารถตรึงไนโตรเจนได้ เปลี่ยนสีของเซลล์ได้ สามารถขึ้นอยู่ได้ทั่วทุกแห่งทั้งน้ำจืด น้ำทะเล น้ำพุร้อน นอกจากนี้ ยังพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน อาจขึ้นรวมอยู่กับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นได้ทั้งพืชและสัตว์ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2544)

### 2.5.2 ลักษณะสำคัญของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

1. สารสีสำหรับการสังเคราะห์แสง

รงควัตถุของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินประกอบด้วย คลอโรฟิลล์เอ เบต้าแคโรทีน แซนโทฟิลล์หลายชนิด ได้แก่ มิโซแซนซิน (Myxoxanthin) มิโซแซนโทฟิลล์(Myxoxanthophyll) ออสซิลาแซนทิน (Oscillaxanthin) ซีอาแซนทิน (Zeaxanthin) ลูเตอีน (Luteein) ฟลาวิซิน (Flavicin) อะฟานิโซฟิลล์ (Aphanizophyll) และอะฟานิซิน (Aphanicin) และไฟโคบิลิน ได้แก่ ซี-ไฟโคไซยานิน (C-phycocyanin) ซี-อัลโลไฟโคไซยานิน (C-allophycocyanin) และซี-ไฟโคอิริทริน (C-phycoerythrin) (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2544) การที่สาหร่ายชนิดนี้มีทั้งคลอโรฟิลล์ และซี-ไฟโคไซยานิน จึงทำให้มองเห็นสีเขียวแกมน้ำเงิน ถ้าสาหร่ายไหนมีซี-ไฟโคอิริทรินมากอาจจะมองเห็นเป็นสีแดงปนอยู่ด้วย สัดส่วนของรงควัตถุดังกล่าวมีต่าง ๆ กัน ซึ่งทำให้สาหร่ายชนิดนี้มีสีแตกต่างกันไป (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549)

2. ผนังเซลล์

ยุวดี (2549) กล่าวว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีผนังเซลล์ 2 ชั้น ชั้นในบาง ประกอบด้วยสารพวกเซลลูโลส ผนังชั้นนอกหนา ประกอบด้วยสารพวกเจลาติน แต่ Prescott (1981) อ้างว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีผนังเซลล์ถึง 3 ชั้น ชั้นในเป็นชั้นที่บาง ประกอบด้วยเซลลูโลส ชั้น

กลางเป็นสารพวกเพคติน ส่วนชั้นนอกสุดเป็นสารพวกเจลาติน ซึ่งเป็นชั้นที่เรียกว่า ปลอกหุ้มหรือชีท ชั้นนี้สามารถเก็บความชื้นไว้ได้มาก ซึ่งเป็นประโยชน์เมื่อสาหร่ายตกอยู่ในสภาพที่แห้งแล้งก็สามารถมีชีวิตอยู่ได้ ชีทที่หุ้มเซลล์สาหร่ายพวกนี้ถ้าเกิดในสาหร่ายที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย อาจจะหุ้มต่อกันเป็นทรงกระบอกภายนอกของเส้นสาย หรืออาจมีชีทชั้นในแต่ละเซลล์ตลอดสายก็ได้ ส่วนมากที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มชีทก็อาจจะหุ้มหนาชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ ชีทที่หุ้มเซลล์ของสาหร่ายเหล่านี้บางชนิดก็บาง บางชนิดก็หนา บางชนิดในชีทนี้อาจจะมีสารพวกเฮมิเซลลูโลสปนอยู่กับพวกเพคตินก็ได้ ชีทอาจจะใส ไม่มีสี เช่นที่พบใน *Chroococcus, Anabaena* จึงทำให้มองไม่ค่อยชัด หรืออาจจะมีสีเหลือง น้ำตาล แดง ม่วง และน้ำเงิน เนื่องจากมีรงควัตถุต่าง ๆ ปนอยู่กับสารเมือกในชีทนี้ เช่น ถ้ามีสารพวกฟัสโคโรดิน (Fuscorhodin) และฟัสโคคลอรีน (Fuscochlorin) จะทำให้ชีทมีสีเหลือง หรือน้ำตาล ถ้ามีสารพวกกลีโอแคปซิน (Gloeocapsin) จะทำให้ชีทมีสีม่วง หรือแดง เช่นที่พบในพวก *Gloeocapsa* เป็นต้น การที่สาหร่ายพวกนี้มีสารเมือก ซึ่งประกอบกันเป็นชีทหุ้มสาหร่าย ดังกล่าวจึงได้ชื่อว่า Slime algae หรือ Myxophyceae

3. ไซโตพลาสซึม

- ไซโตพลาสซึมของสาหร่ายชนิดนี้แตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่น คือจะอยู่ถัดจากผนังเซลล์เข้าไปข้างใน มีเยื่อพลาสมาเมมเบรน (Plasma membrane) หุ้มไว้ ไซโตพลาสซึมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน บริเวณส่วนใน ซึ่งไม่มีรงควัตถุจึงไม่มีสีเรียกว่า เซนโทรพลาสซึม (Centroplasm) ส่วนบริเวณรอบนอกเป็นบริเวณที่มีรงควัตถุสะสมอยู่เรียกว่า โครโมพลาสซึม (Chromoplasm) การแบ่งเขตของทั้ง 2 บริเวณนี้ไม่แน่นอนอาจจะเหลื่อมล้ำกันบ้าง
- บริเวณโครโมพลาสซึมจะมีโครงสร้างที่เป็นเม็ดเล็กๆ กระจายทั่วไปเรียกว่าไซยาโนไฟซินแกรนูล (Cyanophycin granule) เป็นพวกแป้งชนิดหนึ่ง ซึ่งทำปฏิกิริยากับไอโอดีน จะได้สีน้ำตาลปนแดงแทนที่จะได้สีน้ำเงิน นอกจากนั้นยังมีไกลโคเจนแกรนูล (Glycogen granule) และหยดน้ำมันเล็กๆ (Lipid globule) กระจายอยู่ทั่วไป
- สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินไม่มีนิวเคลียสชัดเจนเหมือนสาหร่ายอื่นนักเซลล์วิทยาพบว่ามีสารที่ทำหน้าที่คล้ายนิวเคลียสอยู่ภายในเซนโทรพลาสซึมเพียงแต่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nuclear membrane) เท่านั้น สารที่ทำหน้าที่คล้ายนิวเคลียสนี้คือ DNA (Deoxyribonucleic acid) ซึ่งอาจจะรวมตัวกันเป็นร่างแหหลวม ๆ หรือเป็นท่อนสั้น ๆ หรืออาจจะจับตัวกันแน่นมากมีรูปร่างต่าง ๆ ก็ได้ (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549)

**2.5.3 การสืบพันธุ์**

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศแต่เพียงประการเดียวไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศซึ่งการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549)

1. การแบ่งเซลล์

อาจเกิดกับพวกที่เป็นเซลล์เดียวแต่มีชีทหุ้มอยู่ เมื่อแบ่งหลายๆเซลล์และรวมกันอยู่ในชีทเดียวกันจะมองดูเหมือนพวกที่เป็นโคโลนี แต่เมื่อชีทแตกออกจะกระจัดกระจายเป็นแต่ละเซลล์ หรืออาจจะเกิดกับพวกที่เป็นโคโลนี ซึ่งเมื่อแบ่งเซลล์มากๆจะกลายเป็นโคโลนีใหญ่ ต่อมาก็จะหลุดแยก

ออกเป็นแต่ละโคโลนี ในพวกเส้นสายก็มีการแบ่งเซลล์เช่นเดียวกัน โดนอาจจะเกิดที่เซลล์บริเวณตรัยโคม หรือเซลล์ภายในตรัยโคม (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2549)

2. การสร้างสปอร์

การสร้างสปอร์เป็นการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินอีกแบบหนึ่ง สปอร์ที่สร้างขึ้นเป็นสปอร์ที่ไม่มีหนวด สำหรับเคลื่อนไหว (Non-motile) มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ เอนโดสปอร์ เป็นสปอร์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ แบ่งโปรโตพลาสต์ออกเป็น 2 ส่วน หรือหลายส่วน แต่ละส่วนเมื่อหลุดออกจากผนังเซลล์จะงอกเป็นต้นใหม่ และ เอกโซสปอร์ เป็นสปอร์ที่เกิดขึ้นโดยการแบ่งส่วนของเซลล์ออกมาเป็นสปอร์มีจำนวน 1 หรือ หลายสปอร์เรียงต่อกัน (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2544)

### 2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

การเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบที่จำเป็นในการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำโดยมีแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นวัตถุเสริมได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส กำมะถัน โปแตสเซียม แคลเซียม เหล็ก แมงกานีส และทองแดง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2544)

1. แสง

แสงมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีอิทธิพลทางอ้อมต่ออัตราการดูดซึมธาตุอาหาร โดยผ่านทางการสังเคราะห์แสง สาหร่ายแต่ละชนิดความเหมาะสมของปริมาณแสงจะแตกต่างกัน ปัจจัยที่กำหนดความเข้มของแสง ได้แก่ ความลึกของระดับน้ำ ความขุ่น ความหนาแน่นของสาหร่าย (จงกล พรมยะ, 2552 )

2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ปกติอุณหภูมิของน้ำธรรมชาติจะผันแปรตามอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล ระดับความสูง และสภาพภูมิประเทศ นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแดด กระแสลม ความลึก ปริมาณสารแขวนลอยหรือความขุ่น อุณหภูมิในน้ำธรรมชาติจะผันแปรอยู่ในช่วงระหว่าง 23 ถึง 32 องศาเซลเซียส (สันต์ นาตะสุวรรณ, ไม่พบปีที่พิมพ์) อุณหภูมิของน้ำ มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหาร และกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปทำให้มีการจำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่าย (จงกล พรมยะ , 2552)

3. ความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ความเป็นกรดหรือเบสสูงมักจะใช้ประโยชน์ได้น้อย (อภิรดี เมืองเดช, 2545) แหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปมีค่า pH ระหว่าง 5-9 ซึ่งความแตกต่างขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศ และสภาพแวดล้อมหลายประการ เช่นลักษณะพื้นดิน และหิน ปริมาณน้ำฝน ตลอดจนการใช้ประโยชน์จากที่ดิน บริเวณที่ดินที่มีสภาพเป็นกรดก็จะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดตามไปด้วย (สันต์ นาตะสุวรรณ, ไม่พบปีที่พิมพ์)

4. ออกซิเจนละลาย

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำเป็นลักษณะที่สำคัญที่บอกให้ทราบว่า น้ำนั้นมีความเหมาะสมเพียงใดต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ สิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ที่อาศัยในน้ำต้องการปริมาณ

ออกซิเจนแตกต่างกัน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2551) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำมีความสัมพันธ์กับ อุณหภูมิของน้ำ ความกดดันอากาศ และสิ่งเจือปนในน้ำ ปริมาณออกซิเจนจะช่วยในการควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการบำบัดที่ต้องใช้ออกซิเจน (อภิรดี เมืองเดช, 2545)

5. ธาตุอาหาร

ธาตุอาหารที่สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้าง เช่น ในการสร้างผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ สารสี โปรตีน คาร์โบไฮเดรต จึงใช้ค่อนข้างมาก ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ และโปแตสเซียม (จงกล พรมยะ, 2552 )

6. คาร์บอน

สาหร่ายใช้คาร์บอนซึ่งได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำในรูปของกรดคาร์บอนิค ($H_2CO_3$) และแตกตัวให้คาร์บอเนต ($CO_3^{2-}$) และไบคาร์บอเนตอิออน ($HCO_3^-$) คาร์บอนที่สาหร่ายตรึงไว้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงจะมีปริมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้ง (ปิยบุตร วิเชียรเพริศ, 2550)

7. ไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อสาหร่ายโดยเฉพาะในการใช้สังเคราะห์แสง (ปิยบุตร, 2550) ไนโตรเจนในสาหร่ายมีประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ปริมาณไนโตรเจนในอากาศมีอยู่ถึง 78 เปอร์เซ็นต์ แต่สาหร่ายไม่สามารถนำมาใช้ได้ นอกจากพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ที่มี Heterocyst ซึ่งสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ สาหร่ายสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของ $NH_3$-N ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อกระบวนการสร้างพันธุกรรมของสาหร่าย โดยเป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) กรดอะมิโน และสารสีบางชนิด ถ้าสาหร่ายขากไนโตรเจนจะมีผลต่อการสังเคราะห์แสง และปริมาณสารสีของเซลล์รวมทั้งทำให้กิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดลดลง (จงกล พรมยะ, 2552 )

- อนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียม (Ammonia) ไนไตรท์ (Nitrite) ไนเตรท (Nitrat) แอมโมเนีย จะถูกสาหร่ายนำไปใช้ก่อน ไนเตรท ส่วนไนไตรท์สาหร่ายต้องการในปริมาณที่น้อยหรืออาจไม่ใช้เลย สำหรับไนเตรทนั้นถ้าสาหร่ายนำไปใช้เมื่อดูดซึมเข้าเซลล์แล้ว ต้องเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียก่อนจึงจะนำไปใช้ได้ แอมโมเนียจึงเป็นแหล่งไนโตรเจนของสาหร่าย (จงกล พรมยะ,2552 )
- อินทรีย์ไนโตรเจน เป็นแหล่งไนโตรเจนชนิดดี ส่วนอินทรีย์ไนโตรเจนชนิดอื่นได้แก่ กรดอะมิโน (โดยเฉพาะกรดไกลซีน เซรีน อะลามีน กรดกลูทามิค และกรดแอสพาร์ติค) สาหร่ายต้องใช้เพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งแตกต่างกันตามชนิด (จงกล พรมยะ, 2552 )

8. ฟอสฟอรัส

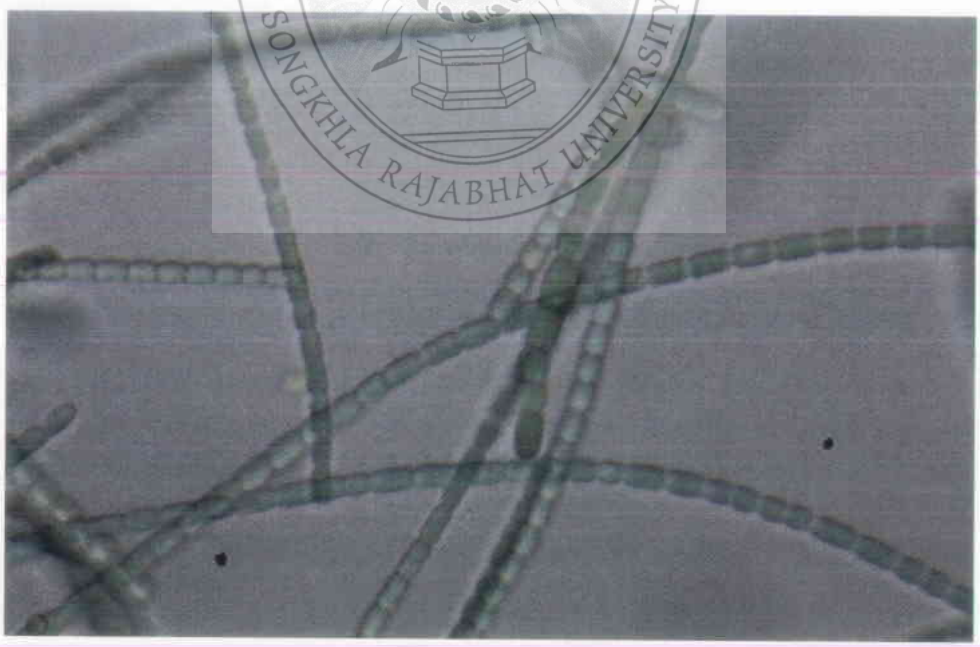
ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อกระบวนการต่างๆ ของเซลล์โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิค (จงกล พรมยะ, 2552) ฟอสฟอรัสมักอยู่ในสภาพที่เพิ่มออกซิเจน (Oxidized state) หรือในรูปอนินทรีย์ (Inorganic orthophosphate ion, $HPO_4^{2-}$ และ $H_2PO_4^-$) หรืออินทรีย์สารซึ่งเป็นแหล่งให้ฟอสฟอรัสแก่แหล่งน้ำ (ปิยบุตร วิเชียรเพริศ, 2550) กล่าวว่าความต้องการฟอสฟอรัสของสาหร่ายแต่ละชนิดไม่เท่ากัน สาหร่ายสีเขียวจะมี

ความต้องการฟอสฟอรัสมากกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่น ถ้าสาหร่ายขาดฟอสฟอรัสจะมีผลต่อการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณสารสีชนิดคลอโรฟิลล์เอ อาร์เอ็นเอ และดีเอ็นเอลดลง (จงกล พรมยะ, 2552)

### 2.5.5 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena*

*Anabaena* sp. มีลักษณะเป็นเส้นสายตรัยโคม (trichome) มักอยู่เดี่ยวๆ ไม่รวมเป็นกลุ่มก้อนเหมือน *Nostoc* ส่วนมากแล้วตรัยโคมมักจะมีลักษณะตรง หรือโค้งงอเล็กน้อย ซีทที่หุ้มไม่หนา เซลล์แต่ละเซลล์มีลักษณะกลมคลายลูกปัด บางชนิดมีลักษณะคล้ายถังเบียร์ (barrel shaped) คือตรงกลางเซลล์ป่อง บางชนิดเป็นรูปเหลี่ยม สร้างเฮเทอโรซิสต์ และอะคินีทตรงตำแหน่งปลาย หรือภายในเส้นสาย ทั้งเฮเทอโรซิสต์และอะคินีทสามารถงอกเป็นตรัยโคมใหม่ได้ (ยุวดี พีรพรพิศาล,2549) สาหร่ายสกุล *Anabaena* มีการจัดอันดับทางอนุกรมวิธานดังนี้ ยุวดี พีรพรพิศาล (2549)

Kingdom : Monera
Division : Cyanophyta
Class : Cyanophyceae
Order : Nostocales
Family : Nostocaceae
Genus : *Anabaena*



**ภาพที่ 2-1** ลักษณะทั่วไปของสาหร่าย *Anabaena* sp.

**2.6 การใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในการกำจัดโลหะหนัก**

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่นิยมนำมากำจัดโลหะหนัก ได้แก่ สาหร่าย *Chlorella* spp. (Rehman and Shakoori, 2001) *Nostoc linckia* และ *Nostoc rivularis* (El-Enany and Issa, 2000) *Cyanospira capsulate* (Philippis และคณะ,2003) *Phormidium* sp. Ruangsomboon S. (2014) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria limnetica* Lemmermann เป็นตัวดูดซับที่มีชีวิตในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสีย พบว่า มีค่าความสามารถดูดซับตะกั่วสูงสุด 434.78 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง Ruangsomboon และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของตะกั่ว ต่อการดูดซับของ *Phormidium angustissimum* พบว่า *P. angustissimum* สามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ต่ำกว่า 5 และความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตรสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และศักดิ์ชัย ชูโชติ (2550) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria jasorvensis* และ *Microcystis aeruginosa* พบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับตะกั่วของ *O. jasorvensis* และ *M. aeruginosa* มีค่าเท่ากับ 114.94 และ 98.04 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง Azizi และคณะ (2012) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในระบบน้ำใช้ โดยใช้ *Oscillatoria* sp. ที่มีชีวิต และแบบแห้งเป็นตัวดูดซับ พบว่าในการใช้ *Oscillatoria* sp. แบบแห้งสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่าแบบมีชีวิต สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 7 Ahuja และคณะ (1999) ได้ศึกษาการดูดซับสังกะสีทางชีภาพ โดย *Oscillatoria anguistissima* พบว่า *O. anguistissima* สามารถดูดซับสังกะสีได้สูงสุดที่ 641.25 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง Tien (2002) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยสาหร่ายน้ำจืด พบว่าการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย 4 ชนิด คือ *Oscillatoria limnetica, Anabaena spiroides, Eudorina elegans* และ *Chlorella vulgaris* ในสารละลายตะกั่วไนเตรท สารละลายแคดเมียมคลอไรด์ และสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต และจากการทดลองพบว่า สาหร่ายชนิด *O. limnetica* มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและคอปเปอร์ได้ดีที่สุด ส่วนในการดูดซับแคดเมียมของ *O. Limnetica* พบว่าไม่สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากเหมือนโลหะอื่น Kumar และคณะ (2011) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยสาหร่าย *Oscillatoria* sp. และ *Phormidium* sp. พบว่าในการใช้สาหร่าย *Oscillatoria* sp. และ *Phormidium* sp. ดูดซับตะกั่ว แบบกะ โดยศึกษา พีเอช 2 4 6 8 และ 10 ใช้เวลา 5-180 นาที ใช้ความเข้มข้น ที่ 1 3 5 และ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ pH 7 ค่าความสามารถสูงสุดในการกำจัดของ *Oscillatoria* sp. ที่เวลา 25 นาที และของ *Phormidium* sp. ที่เวลา 30 นาที ส่วนการศึกษาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิดอื่นกำจัดโลหะหนัก พบว่าศึกษาของ อทิยา สะพานกลาง และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ (2553) ได้ศึกษาการเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สารอาหารที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่า การเลี้ยง *Phormidium* sp. ในอาหารเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าการเจริญเติบโตสูงที่สุด โดยมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.7 5$\pm$ 0.03 กรัมต่อลิตรอายุการเลี้ยง 4 สัปดาห์ ให้ค่าการดูดซับตะกั่วสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 93.89 $\pm$ 3.56 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง อทิยา สะพานกลาง และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ (2553) ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม และกลไกการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโดยใช้ไซยาโนแบคเทีเรีย *Stigonema* sp. โดยเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 ที่ระยะปลายการเจริญเติบโตเต็มที่ เป็นตัวดูดซับ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับของสารละลาย

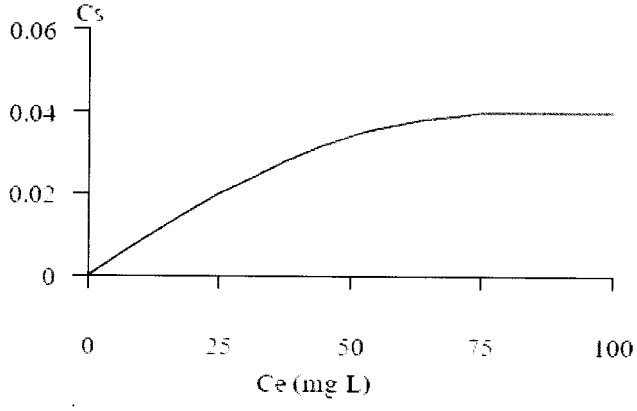
ตะกั่วคือพีเอช 5 การดูดซับเกิดอย่างรวดเร็วและถึงจุดสมดุลที่ 48 ชั่วโมง โดยจุดสมดุลมีค่าการดูดซับเท่ากับ 103.4 $\pm$ 0.49 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ชนมสุข สุขุม และดวงรัตน์ อินทร (2553) ศึกษาการกำจัดไตรวาเลนซ์โครเมียมโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Rivularia* sp. และ *Stigonema minutum* พบว่า ความสามารถในการดูดซับไตรวาเลนซ์โครเมียมสูงสุดเท่ากับ 38.27 และ 43.59 มิลลิกรัมไตรวาเลนซ์โครเมียมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง Celekli and Bozkurt (2011) ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียม และนิเกิล ทางชีวภาพโดยใช้ *Spirulina platensis* พบว่า ในช่วง 60 นาทีแรก สาหร่าย *S. platensis* สามารถดูดซับโลหะหนักแคดเมียมได้ 73.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และดูดซับนิเกิลได้ 69.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5 Singh และคณะ (2008) ได้ศึกษาการกำจัดคอปเปอร์ และตะกั่ว โดยสาหร่าย *Pithophora oedogonia* และการชะโลหะออกจากเซลล์ พบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับคอปเปอร์ และตะกั่ว โดย *P. Oedogonia* ที่ พีเอช 4.5 และ 5 และการชะออกจากเซลล์โดยใช้ HCl และ EDTA สามารถชะอกได้ 92-96 เปอร์เซ็นต์ ในการดูดซับและการชะออกเป็นไปอย่างรวดเร็วภายในเวลา 15 นาที นอกจากนี้ พบว่า สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักที่ต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสาหร่าย ความเข้มของแสง อุณหภูมิ พีเอช ระยะเวลา และธาตุอาหาร

## 2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption isotherms)

เป็นการแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้น ณ จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมเป็นการแสดงความสามารถในการดูดซับเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ทำให้ได้กราฟของวัตถุที่ถูกดูดซับระหว่างความ เข้มข้นที่สมดุลของสารถูกดูดซับ และสารถูกดูดซับ (พจนีย์ โลมรัตน์, 2549 อ้างจาก Khummongkol และคณะ, 1982) ได้มีการใช้ไอโซเทอมการดูดซับเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การดูดซับหลายๆ รูปแบบ โดยมีการค้นคว้าแบบจำลองสำหรับการดูดซับทางกายภาพบางส่วนเพื่อเพิ่มสมการที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทางเคมีด้วย

2.7.1 แบบจำลองการดูดซับที่นิยมใช้อธิบายข้อมูลการดูดซับที่พบโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

1. Langmuir isotherm แบบจำลองนี้พัฒนามาจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของของแข็ง โดยมีสมมติฐานว่าพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่และไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพื้นผิว การดูดซับจะเกิดเฉพาะที่ โดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีบริเวณที่แน่นอนในการดูดซับ คือเป็นการดูดซับบนพื้นผิวชั้นเดียว เมื่อพิจารณากราฟของแบบจำลอง Langmuir isotherm สามารถอธิบายได้ว่า ที่เฟสของเหลว (Liquid phase) เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงว่าผิวของสารดูดซับ จะถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับในสัดส่วนที่มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารในเฟสของสารละลาย (Solution phase) สูงขึ้น สารดูดซับจะอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ จุดที่ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะไม่เกิดการดูดซับสารใดๆ อีก (ภาพที่ 2-2 และ 2-3) ซึ่งแสดงการดูดซับสูงสุดของสารถูกดูดซับในเฟสของน้ำ โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่า 75 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นอีก (พจนีย์ โลมรัตน์, 2549 อ้างจาก Samuel and Osman, 1986)




**ภาพที่ 2-2** แบบจำลอง Langmuir isotherm
ที่มา : พจนีย์ โลมรัตน์ (2549) อ้างจาก Samuel and Osman (1986)

สมการที่ใช้อธิบายระบบของ Langmiur คือ

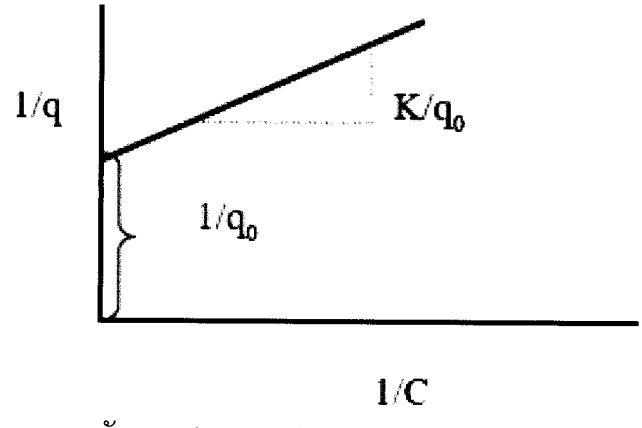
$$q = \frac{q_0 C}{K + C}$$ สมการที่ 1

โดย q คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับหนึ่งหน่วยมวล
$q_0$ คือ ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับหนึ่งหน่วยมวล
C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สมดุล
K คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

จากสมการที่ 1 จะได้

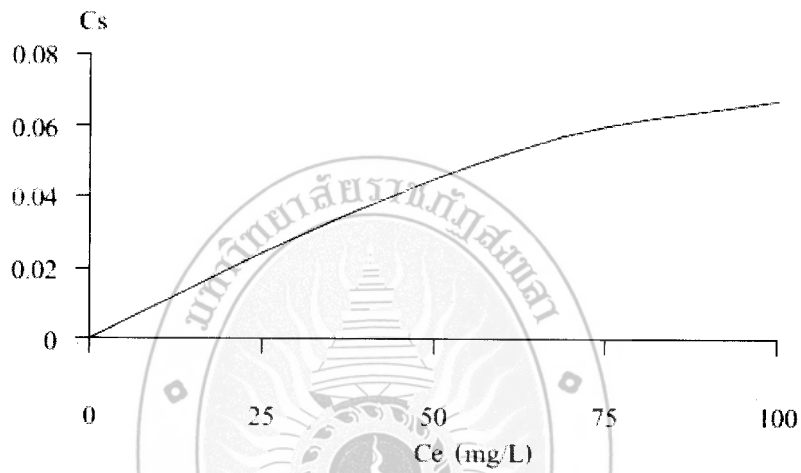
$$\frac{1}{q} = \frac{K}{q_0 C} + \frac{1}{q_0}$$ สมการที่ 2

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 1/q กับ 1/C จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน เท่ากับ $K/q_0$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_0$ ดังภาพที่ 22




**ภาพที่ 2-3** ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir
ที่มา: พจนีย์ โลมรัตน์ (2549) อ้างจาก Samuel and Osman (1986)

2. Freundlich isotherm เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เทียบกับตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนักกับความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกละลายในสารละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยลักษณะของไอโซเทอมแบบนี้คือ การดูดซับจะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารดูดซับแต่ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มในอัตราส่วนที่น้อยลง ดังภาพที่ 2-4 ซึ่งการดูดซับเกิดเพิ่มมากขึ้นเพราะโมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับได้หลายชั้น




**ภาพที่ 2-4** แบบจำลอง Freundlich isotherm
ที่มา: พจนีย์ โลมรัตน์ (2549) อ้างจาก Samuel and Osman (1986)

ไอโซเทอมของการดูดซับ แบบ Freundlich เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

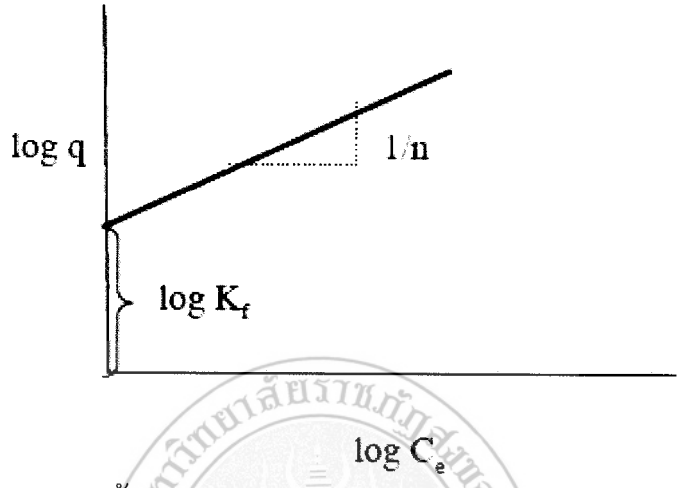
$$q = K C^{1/n} \qquad \text{สมการที่ 3}$$

โดย q คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับหนึ่งหน่วยมวล
C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สมดุล
K และ n คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
จากสมการที่ 3 จะได้

$$\log q = \log K_f + (1/n) \log C \qquad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log q กับ log Ce จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1/n และตัดแกน y ที่ค่า y = log $K_f$ (ภาพที่ 2-5) ซึ่งค่าคงที่สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถในการดูดซับได้ โดยค่า 1/n แสดงถึง ความเร็วในการดูดซับ (adsorption intensity) หากมีค่าสูงแสดงว่าจะดูดซับตัวถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็ว และค่า $K_f$ บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับของสารดูดซับ (adsorption capacity) หากมีค่าสูงแสดงว่า

สามารถดูดซับตัวถูกดูดซับได้ในปริมาณมาก (พจนีย์ โลมรัตน์, 2549 อ้างจาก Goyal และคณะ, 2003)




**ภาพที่ 2-5** ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich
ที่มา : พจนีย์ โลมรัตน์ (2549) อ้างจาก Samuel and Osman (1986)

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางชีวภาพ

1. ความเป็นกรดด่าง

เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการขนส่งไอออนของโลหะหนักโดยเกี่ยวข้องกับการดูดซับบนผิวหน้าของเซลล์ซึ่งเป็นสารดูดซับ และแรงปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีของไอออนโลหะในสารละลายและบริเวณดูดซับบนผิวเซลล์ สารที่ทำให้เกิดมลพิษชนิดต่าง ๆ จะมีค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับต่างกัน ขึ้นอยู่กับสารละลายเคมีแต่ละชนิดที่ความเป็นกรดสูงหรือค่า pH ต่ำจะมีปริมาณความเข้มข้นของโปรตอน ($H^+$) สูง ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโปรตอนกับบริเวณผิวหน้าของเซลล์ จึงมีบริเวณที่ว่างสำหรับให้ไอออนของโลหะได้เกาะเป็นปริมาณน้อย เมื่อความเป็นด่างสูงหรือมีค่า pH สูง ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ($OH^-$) บนผิวหน้าของเซลล์จะเพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่สำหรับดูดซับไอออนของโลหะซึ่งมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น การดูดซับของโลหะหนักจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าค่าความเป็นด่างของสารละลายตัวกลางมีค่าสูง (มีค่า pH สูงกว่า 6) อาจทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักขึ้นได้ ทำให้ไอออนของโลหะหนักถูกดูดซับได้น้อยลง (พจนีย์ โลมรัตน์, 2549 อ้างจาก Alicia และคณะ, 1998)

2. เซลล์ที่เป็นตัวดูดซับในสภาวะมีชีวิตและไม่มีชีวิต

ทั้งเซลล์ที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตต่างก็สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ สำหรับเซลล์ที่มีชีวิต โลหะหนักจะสามารถถูกเคลื่อนย้ายเข้าไปอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ได้ โดยขึ้นอยู่กับกิจกรรมทางด้านเมตาบอลิซึม เป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยพลังงานในการเคลื่อนย้ายเซลล์ที่มีชีวิตถูกนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากตัวดูดซับทางชีวภาพนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ต้องนำเซลล์ใหม่มาแทนที่ เมื่อมีปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับเข้าไปเต็มแล้วอย่างไรก็ตาม การรักษาเซลล์ให้มีชีวิตอยู่ตลอดกระบวนการดูดซับโลหะหนักเป็นเรื่องยากเนื่องจากเซลล์เหล่านี้ต้องการอาหารอย่าง

สม่ำเสมอ และต้องหลีกเลี่ยงสภาพความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีต่อเซลล์จุลินทรีย์ด้วย (พจนีย์ โลมรัตน์, 2549 อ้างจาก Volesky, 1990; Kapoor และคณะ, 1999) ในขณะที่การดูดซับโลหะหนักโดยใช้เซลล์ที่ตายแล้วจะได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเซลล์ที่ไม่มีชีวิตแล้วสามารถแยกชนิดของโลหะหนักตามหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์และผนังเซลล์ และยังมีข้อดีของการใช้เซลล์ที่ไม่มีชีวิตในการดูดซับโลหะหนักหลายประการ เช่น ไม่ต้องกังวลถึงข้อจำกัดเรื่องความเป็นพิษของโลหะหนัก ไม่ต้องการอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิต สามารถทำให้โลหะหนักที่ถูกดูดซับเข้าไปถูกปลอดปล่อยออกมาได้ และระบบการดูดซับพื้นฐานของเซลล์ที่ไม่มีชีวิตง่ายต่อการประยุกต์ใช้ตามทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อพัฒนาเป็นระบบการดูดซับที่ใหญ่ขึ้นได้ (พจนีย์ โลมรัตน์, 2549 อ้างจาก Gadd, 1990)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# บทที่ 3

# อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

## 3.1 อุปกรณ์เครื่องมือ

### 3.1.1 อุปกรณ์เครื่องมือ

1) เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AA-6200
2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler รุ่น AG 204
3) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler รุ่น PG 2002-S
4) เครื่องเขย่า ยี่ห้อ N-Biotek รุ่น NB-101S
5) เครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100N
6) เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง ยี่ห้อ Mettler รุ่น MP 220 K
7) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ Mettler รุ่น MC 226
8) ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น ULE 500
9) เครื่องเขย่าหลอดทดลอง ยี่ห้อ IKA WORK รุ่น MS-1 Minishaker
10) เครื่องกรอง ยี่ห้อ Millipore รุ่น XX2504700/MZ4
11) เครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว ยี่ห้อ Andreas Hettich รุ่น Universal 32
12) กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ Nikon รุ่น E600
13) กระดาษกรอง GF/C ยี่ห้อ Whatman

## 3.2 วิธีการดำเนินการ

**3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำทิ้ง ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา**

เก็บตัวอย่างน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบของสำนักงานเทศบาลนครสงขลา ด้วยการจ้วงตักจากระบบรวบรวมน้ำชะขยะก่อนเข้าระบบบำบัด และทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เพียงครั้งเดียว 1 ตัวอย่าง จำนวน 3 ซ้ำ เพื่อให้น้ำทิ้งที่นำมาใช้มีลักษณะสมบัติเดียวกันตลอดการทดลอง การเก็บรักษาน้ำตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์โดยดำเนินการตามวิธีการซึ่งกำหนดโดย EPA ตารางที่ 3-1

**ตารางที่ 3-1** แสดงวิธีการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำใช้ในการวิเคราะห์

| พารามิเตอร์ | การเก็บรักษา | ช่วงระยะเวลายอมให้เก็บ |
|---|---|---|
| บีโอดี<br>ซีโอดี | แช่เย็น 4 °C<br>เติม $H_2SO_4$ถึง pH < 2,<br>แช่เย็น 4 °C | 4 ชั่วโมง<br>7 วัน |
| | วิเคราะห์ทันที | 2 ชั่วโมง |

**ตารางที่ 3-1** (ต่อ)

| พารามิเตอร์ | การเก็บรักษา | ช่วงระยะเวลายอมให้เก็บ |
|---|---|---|
| pH | แช่เย็น 4 °C | 28 วัน |
| สภาพนำไฟฟ้า | เก็บในที่มืด,แช่เย็น 4 °C | 24 ชั่วโมง |
| ความขุ่น | เติม $HNO_3$ ถึง pH < 2 | 6 เดือน |
| โลหะหนัก | | |

**ที่มา** : ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธิศักดิ์ (2540)

### 3.2.2 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำทิ้ง ศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ใช้ในการทดลองอ้างอิงจาก Official Methods of Analysis of AOAC (1984) และ Standard Methods for the Examination Water and Wastewater (2005) ดังแสดงในตารางที่ 3-2

**ตารางที่ 3-2** วิธีการวิเคราะห์

| พารามิเตอร์ | วิธีการ |
|---|---|
| BOD | Dilution Method |
| COD | Closed Reflux Titrimetric Method |
| pH | Electrometric Method |
| Conductivity | Electrical Conductivity Method |
| Turbidity | Nephelometric Method |
| Temperature | Mercury field thermometer |
| Cadmium | Atomic Absorption Spectrometric Method |
| Lead | Atomic Absorption Spectrometric Method |

### 3.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยง *Anabaena* sp. (ดัดแปลงจากวิธีการของ Prerna *et al.*,1997)

1. เพาะเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena* ที่นำมาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในอาหารสูตร BGA (basal BGA Medium) 200 มิลลิลิตรที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้วที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยวิธีปลอดเชื้อวางบนเครื่อง

เขย่า ใช้ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน (สุมิตร หมู่พยัคฆ์, 2545)

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Anabaena* sp.

2.1 อาหาร

นำสาหร่าย จาก 1 จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในอาหาร BGA, BG-11, Allen's Medium และ NS III Medium ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปวางบนเครื่องเขย่าที่ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน กรองเซลล์ด้วยกระดาษกรอง GF/C อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาใส่ตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วันชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง คำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งบันทึกผล

2.2 พีเอช

นำสาหร่าย ตามข้อ 1 จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในอาหารที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.1 ที่มีค่า พีเอช 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 โดยใช้ $HNO_3$ 0.1 โมลต่อลิตร และ NaOH 0.1 โมลต่อลิตรในการปรับ นำไปวางบนเครื่องเขย่าที่ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน กรองเซลล์ด้วยกระดาษกรอง GF/C อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาใส่ตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วันชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง คำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งบันทึกผล

2.3 อุณหภูมิ

นำสาหร่าย ตามข้อ 1 จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในอาหารที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.1 และพีเอชที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.2 ที่อุณหภูมิ 20 25 30 และ 35 องศาเซลเซียส นำไปวางบนเครื่องเขย่าที่ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน กรองเซลล์ด้วยกระดาษกรอง GF/C อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาใส่ตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วันชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง คำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งบันทึกผล

2.4 ความเข้มแสง

นำสาหร่าย ตามข้อ 1 จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในอาหารที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.1 พีเอช ที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.2 และ อุณหภูมิที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.3 ที่ความเข้มแสง 1000, 3000 และ 5000 ลักซ์นำไปวางบนเครื่องเขย่าที่ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 วัน กรองเซลล์ด้วยกระดาษกรอง GF/C อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาใส่ตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วันชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง คำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งบันทึกผล

2.5 ระยะเวลา

นำสาหร่าย ตามข้อ 1 จำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในอาหารที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.1 พีเอช ที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.2 และ อุณหภูมิที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.3 ที่ความเข้มแสงที่ดีที่สุด ตามข้อ 2.4 นำไปวางบนเครื่องเขย่าที่ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 10, 15 และ20 วัน กรองเซลล์ด้วยกระดาษกรอง GF/C อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาใส่ตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วันชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง คำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งบันทึกผล

การคำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งโดยใช้สูตร

$$\text{Algal dry weight (mg/l)} = \frac{[A]-[B]\times 1000}{\text{Vol. of culture}}$$

A = weight of filter paper + algae

B = weight of filter paper

เมื่อหาสภาวะที่เหมาะแล้ว เลี้ยงสาหร่ายเพื่อนำไปทดสอบการดูดซับโลหะหนักต่อไปโดยนำสาหร่ายที่เลี้ยงมาหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิหมุนเหวี่ยง 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และใช้น้ำ Deionized water ล้างเซลล์ 3 ครั้ง จากนั้นจึงนำเซลล์ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

**3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมของสาหร่าย *Anabaena* sp.** (ดัดแปลงจาก Miranda, J. และคณะ 2012 และ ภาณุมาศ พรหมเทศ, 2548)

1. ศึกษาระดับความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

เตรียมสารละลายมาตรฐาน ตะกั่วหรือแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ดังนี้ คือ 5.0 6.0 7.0 8.0 และ 9.0 โดยใช้ 0.1 โมลต่อลิตร $HNO_3$ และ 0.1 โมลต่อลิตร NaOH ในการปรับความเป็นกรด-ด่าง ชั่งสาหร่าย *Anabaena* sp. ปริมาณ 0.3 กรัม ใส่ลงในสารละลายตะกั่วหรือแคดเมียมที่มีความเป็นกรด-ด่างต่างๆกัน ได้แก่ 5.0 6.0 7.0 8.0 และ9.0 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C นำส่วนของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วหรือแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer) คำนวณหาปริมาณตะกั่วหรือแคดเมียมที่เหลือภายหลังการดูดซับ

2. ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วหรือแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีความเป็นกรด-ด่างตามข้อ 1 โดยใช้ 0.1 โมลต่อลิตร $HNO_3$ และ 0.1 โมลต่อลิตร NaOH ในการปรับความเป็นกรด-ด่าง ชั่งสาหร่าย *Anabaena* sp. ปริมาณ 0.3 กรัม ใส่ลงใน

สารละลายตะกั่วหรือแคดเมียม นำไปเขย่าที่ความเร็ว125 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ดังนี้ คือ 30 60 90 120 150 และ180 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ระยะเวลาต่างๆ ไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C นำส่วนของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วหรือแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS คำนวณหาปริมาณตะกั่วหรือแคดเมียมที่เหลือภายหลังการดูดซับ

3. ศึกษาปริมาณของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. ต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วหรือแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเป็นกรด ด่าง ตามข้อ 1 โดยใช้ 0.1 โมลต่อลิตร $HNO_3$ และ 0.1 โมลต่อลิตร NaOH ในการปรับความเป็นกรด-ด่าง ชั่งสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่ปริมาณแตกต่างกัน ดังนี้ คือ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 กรัม ลงในสารละลายตะกั่วหรือแคดเมียม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาตามข้อ 2 จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ปริมาณต่างๆ ไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C นำส่วนของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วหรือแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS คำนวณหาปริมาณตะกั่วหรือแคดเมียมที่เหลือภายหลังการดูดซับ

**3.2.5 ศึกษาประสิทธิภาพของ *Anabaena* sp. ในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา**

เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จำนวน 2 ชุด ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ตามข้อ 3.2.4 (1) จากนั้นชั่งสาหร่าย *Anabaena* sp. ตามข้อ 3.2.4 (3) ลงในสารละลายตะกั่วหรือแคดเมียม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลา ตามข้อ 3.2.4 (2) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ความเข้มข้นต่างๆ ไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C นำส่วนของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วหรือแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS คำนวณหาปริมาณตะกั่วหรือแคดเมียมที่เหลือภายหลังการดูดซับ

**3.2.6 ศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม**

ในการทดลองนี้จะศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว หรือแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ได้แก่ 1 10 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 100 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่าง ตามข้อ 3.2.4 (1) จากนั้นชั่งสาหร่าย *Anabaena* sp. ตามข้อ 3.2.4 (3) ลงในสารละลายตะกั่วหรือแคดเมียม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลา ตามข้อ 3.2.4 (2) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ความเข้มข้นต่างๆ ไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C นำส่วนของสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วหรือแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS คำนวณหาปริมาณตะกั่วหรือแคดเมียมที่เหลือภายหลังการดูดซับ

**3.2.7 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม**

การศึกษาไอโซเทอม หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ Ce สามารถหาได้โดยการนำค่า q และ Ce มาเขียนเป็นกราฟ โดยให้ q อยู่ในแนวแกนตั้ง และ Ce อยู่ในแนวแกนนอน เรียกกราฟนี้ว่า

ว
363.73944
ป17ก
24 พ.ค. 2551

ไอโซเทอม (Isotherm) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้านบน จะถูกนำมารวมกับสมการไอโซเทอมของการดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอมของ Frundlich และ Langmuir Adsorption Isotherm เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของสาหร่าย *Anabaena* sp. โดยพิจารณาจากค่า $R^2$ ในการบ่งบอกสมการที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

การคำนวณปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณเซลล์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ($q_e$ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม)

$$qe = \frac{V(C_i - C_f)}{m} \qquad \text{สมการที่ 6}$$

V คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะหนัก (ลิตร)

$C_i$ คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_f$ คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

m คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (กรัม)

(Miranda, J. และคณะ, 2012 และ กุลธิดา สะอาด, 2557)

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# บทที่ 4

# ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

## 4.1 สมบัติทางกายภาพบางประการในน้ำทิ้ง

จากการทดลองตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา พบว่า ปริมาณความขุ่นของน้ำทิ้งเท่ากับ 12.8±0.40 NTU อุณหภูมิเท่ากับ 29.16±0.28 องศาเซลเซียส ค่านำไฟฟ้าเท่ากับ 501±31 mS/cm ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.24±0.01 ดังแสดงในตารางที่ 4-1

**ตารางที่ 4-1** ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพบางประการในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

| สมบัติทางกายภาพ | ค่าเฉลี่ย |
|---|---|
| ความขุ่น (NTU) | 12.80±0.40 |
| อุณหภูมิ (°C) | 29.16±0.28 |
| ค่านำไฟฟ้า (mS/cm) | 501±31 |
| ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) | 7.24±0.01 |

## 4.2 สมบัติทางเคมีบางประการในน้ำทิ้ง

จากการทดลองตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา พบปริมาณตะกั่วในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.0083±0.0010 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 0.0032 ± 0.0004 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) เท่ากับ 0.75±0.16 กรัมต่อลิตร ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD) เท่ากับ 120±60 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD) เท่ากับ 256±32 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4-2 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศคณะกรรมการควบคุมมลพิษจะเห็นว่า ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี ในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อยู่ในระดับเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

**ตารางที่ 4-2** ค่าเฉลี่ยของสมบัติทางเคมีบางประการในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

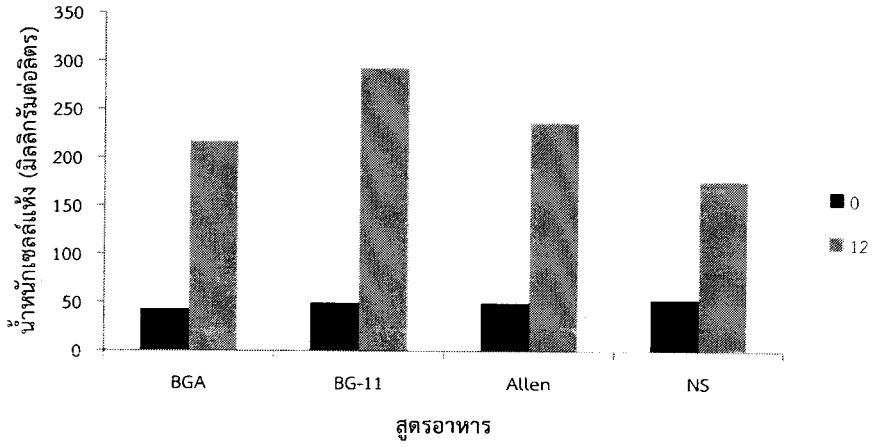
| สมบัติทางเคมี | ค่าเฉลี่ย |
|---|---|
| ตะกั่ว (mg/l) | 0.008 ±0.0010 |
| แคดเมียม (mg/) | 0.0032±0.0004 |
| TSS (g/l) | 0.75±0.16 |
| BOD (mg/l) | 120±60 |
| COD (mg/l) | 256±32 |

ในขณะที่ การศึกษาของ ศิริพร หงส์พันธ์ และคณะ (2545) ได้ศึกษาการพัฒนาระบบการจัดการน้ำทิ้งภายในสถาบันราชภัฏนครราชสีมาโดยใช้เทคโนโลยีสะอาด พบว่า ในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ในน้ำทิ้ง 6.37-7.41 ความขุ่นมีค่า 42.40-79.00 NTU อุณหภูมิมีค่า 22.2-30.8 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้ามีค่า 319-444 μmho/cm ค่าบีโอดี อยู่ระหว่าง 8.50-22.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และซีโอดี อยู่ระหว่าง 80-121 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันโดยมีนัยสำคัญ เกิดจากปริมาณการใช้งานและชนิดของงานตามภารกิจของศูนย์วิทยาศาสตร์ ของแต่ละสถาบันเพื่อใช้ในการเรียนการสอน และงานวิจัยที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ปล่อยลงไปตามสู่บ่อน้ำทิ้งมีปริมาณที่แตกต่างกัน

### 4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Anabaena* sp.

#### 4.3.1 สูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

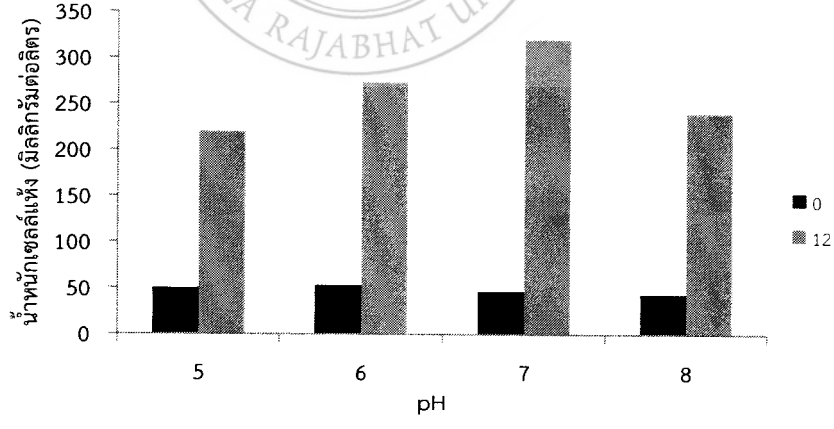
จากการนำสาหร่าย *Anabaena* sp. มาเพาะเลี้ยงในอาหาร BGA, BG-11, Allen's Medium และNS III Medium ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 125 มิลลิลิตร เลี้ยงบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน ทำการเก็บเซลล์โดยการวัดการเจริญเติบโตด้วยการชั่งน้ำหนักแห้ง พบว่าในอาหารสูตร BGA, BG-11, Allen's Medium และ NS III Medium ได้น้ำหนักแห้งเป็น 216.7, 293.3, 236.7, และ 176.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่4-1) จะเห็นว่าอาหารสูตร BG-11 เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย




**ภาพที่ 4-1** ผลของสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เวลาเริ่มต้น (0) วัน และ (12) วัน

### 4.3.2 ความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

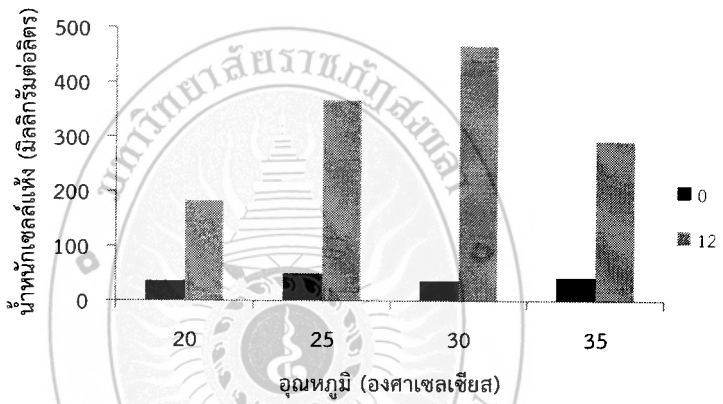
จากการนำสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่เหมาะสม และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็น 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 125 มิลลิลิตร เลี้ยงบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน พบว่าในสูตรอาหารที่มีพีเอช 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 ได้น้ำหนักแห้งเป็น 220, 273.3, 320 และ 240 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่4-2) จากภาพจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp.




**ภาพที่ 4-2** ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp.ที่เวลาเริ่มต้น (0) วัน และ (12) วัน

### 4.3.3 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

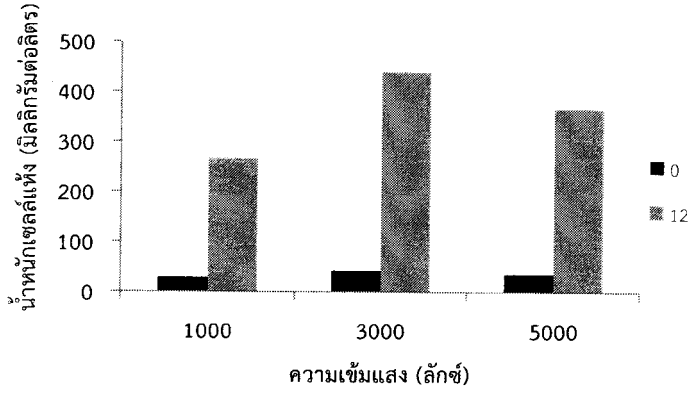
จากการนำสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่เหมาะสม และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 125 มิลลิลิตร เลี้ยงบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม ได้น้ำหนักแห้งเป็น 183.3, 366.7, 466.7 และ 293.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่4-3) จากภาพอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp.




**ภาพที่ 4-3** ผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เวลาเริ่มต้น (0) วัน และ (12) วัน

### 4.3.4 ความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

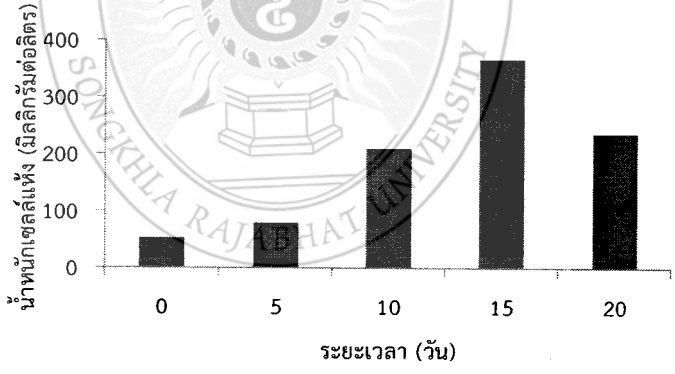
จากการนำสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่เหมาะสม ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 125 มิลลิลิตร เลี้ยงบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ ที่เหมาะสม ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มแสง 1,000, 3,000 และ 5,000 ลักซ์ เป็นเวลา 12 วัน พบว่าความเข้มแสงที่เหมาะสม 1,000, 3,000, และ 5,000 ลักซ์ ได้น้ำหนักแห้งเป็น 266.7, 440 และ 366.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่4-4) โดยความเข้มแสงที่ 3,000 ลักซ์ เป็นความเข้มแสงที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp.




**ภาพที่ 4-4** ผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เวลาเริ่มต้น (0) วัน และ (12) วัน

### 4.3.5 ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

จากการนำสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่เหมาะสม ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 125 มิลลิลิตร เลี้ยงบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ และความเข้มแสงที่ เป็นเวลา 0, 10, 15 และ 20 วันได้น้ำหนักแห้งเป็น 53.3, 80, 210, 366.7 และ 236.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่4-5) จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. คือ 15 วัน



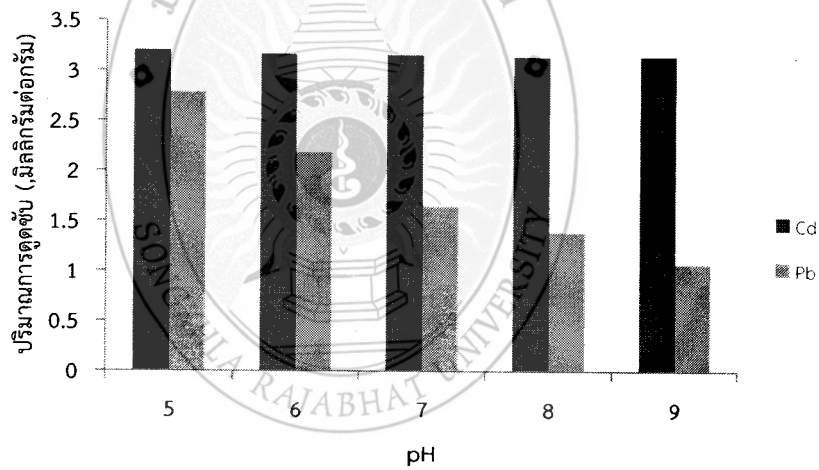

**ภาพที่ 4-5** ผลของระยะเวลาต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp.

## 4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

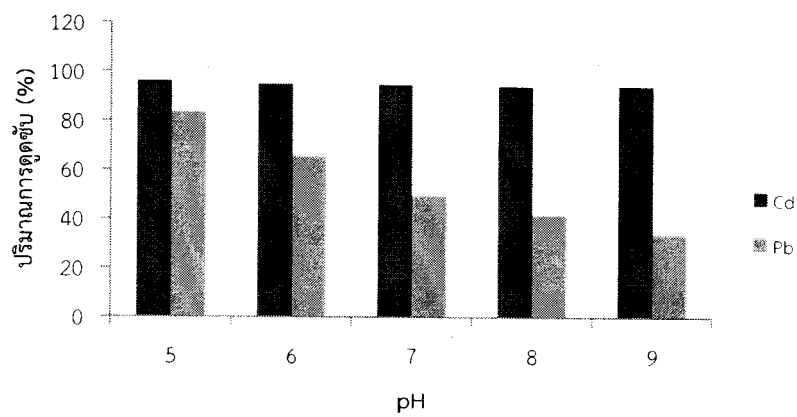
### 4.4.1 ระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

การศึกษาค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม พบว่าสาหร่าย *Anabaena* sp. มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในสารละลายที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ได้ดีที่สุด คือ 2.79 และ 3.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 4-6) คิดเป็นร้อยละ 83.56 และ 96.14 ตามลำดับ (ภาพที่ 4-7) ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม ของสาหร่าย *Anabaena* sp. จะลดน้อยลง เมื่อค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายมาตรฐานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสารละลายมาตรฐานมีสภาพเป็นกรด เมื่อปรับสภาพให้เป็นด่างมากขึ้น สารละลายมาตรฐานก็จะจับตัวกันเป็นตะกอนทำให้ความสามารถในการดูดซับลดน้อยลง สอดคล้อง

กับการทดลองของ Gupta และคณะ (2006) ได้ศึกษาการดูดซับทองแดงในสารละลายโดยใช้สาหร่าย *Spirogyra* sp. พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับทองแดงโดยสาหร่าย *Spirogyra* sp. ได้ 133.3 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง5 เวลาสัมผัสที่ 120 นาที การศึกษาของ Miranda และคณะ (2012) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมโดยสาหร่าย *Oscillatoria laete-virens* พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 5 มีความสามารถดูดซับสูงสุดที่ 20.36 มิลลิกรัมต่อกรัม และการศึกษาของ อาทิตยา สะพานกลาง และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ (2553) ซึ่งศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Stigonema* sp. พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับของสารละลายตะกั่ว คือ 5 โดยที่จุดสมดุลมีค่าการดูดซับเท่ากับ 103.4±0.49 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ต่างจากการศึกษาของ Azizi และคณะ (2012) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมจากน้ำทิ้งโดยสาหร่าย *Oscillatoria* sp. พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการดูดซับของสารละลายแคดเมียม คือ 7 เนื่องจากสารละลายที่ใช้ดูดซับมีการใช้ความร้อนทำให้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรดอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ความสามารถดูดซับของสาหร่ายลดน้อยลง



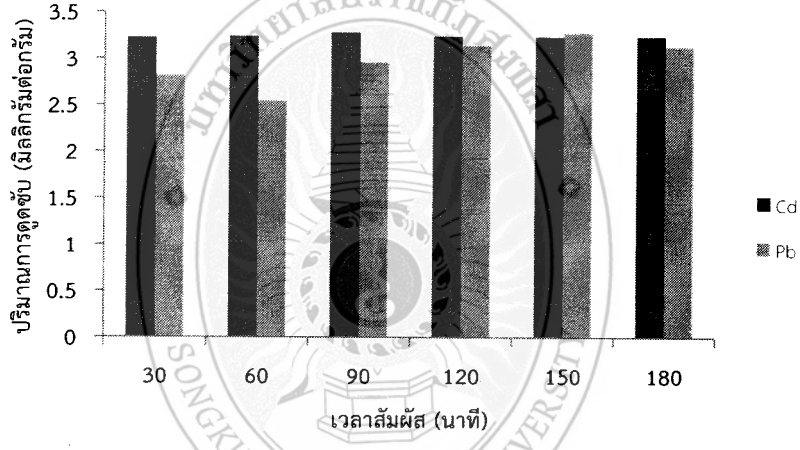

**ภาพที่ 4-6** ปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ค่าความเป็นกรดด่างต่าง ๆ



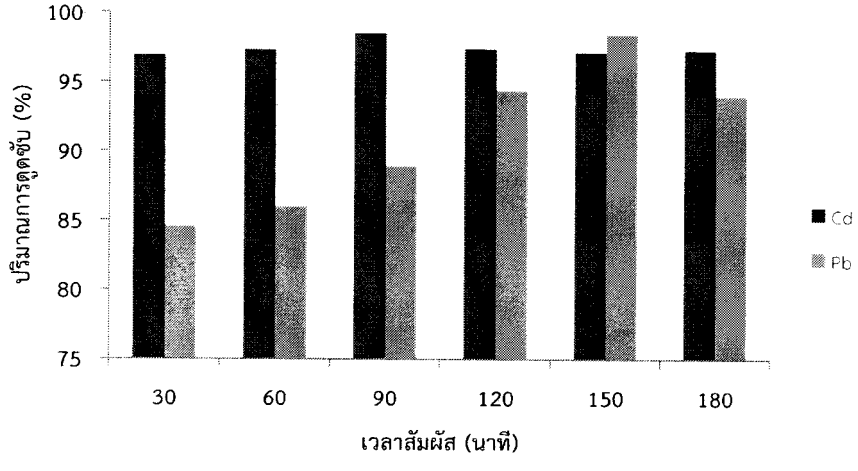

**ภาพที่ 4-7** เปอร์เซ็นต์ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ค่าความเป็นกรดด่างต่าง

### 4.4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

การทดลองการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม โดย *Anabaena* sp. พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม คือ 150 และ 90นาที โดยดูดซับได้ 3.28 และ 3.28 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 4-8) คิดเป็นร้อยละ 98.41 และ 98.50 (ภาพที่ 4-9) ในขณะที่ระยะเวลาผ่านไปทำให้ความสามารถในการดูดซับลดน้อยลง จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของสาหร่าย *Anabaena* sp. ในเวลาต่างๆ กัน แต่มีความสามารถในการดูดซับไม่ต่างกัน จากการศึกษาการกำจัดแคดเมียมโดยสาหร่าย *Oscillatoria* sp. ของ Katircioglu และคณะ (2008) พบว่าระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมตั้งแต่ 5-30 นาที แต่เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการดูดซับจะคงที่ และการศึกษาของ อทิตยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ (2553) พบว่า การดูดซับตะกั่วโดย *Stigonema* sp. เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 6 ชั่วโมงแรก จากนั้นเริ่มช้าลงหลังจากการดูดซับผ่านไป 24 ชั่วโมง และเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลที่ 48 ชั่วโมง



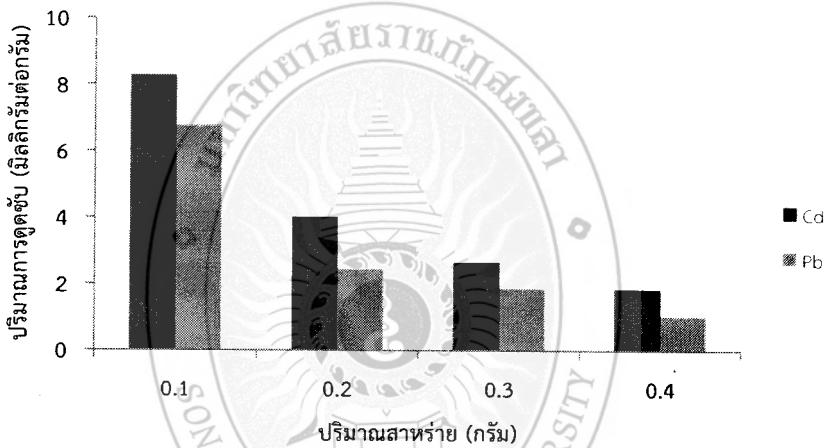

**ภาพที่ 4-8** ปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ



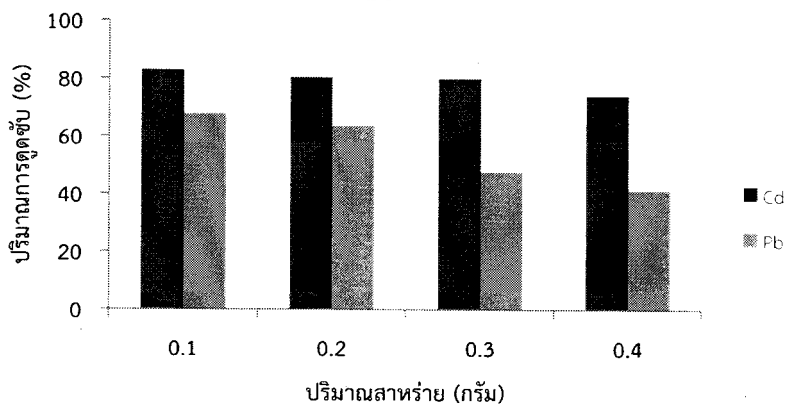

**ภาพที่ 4-9** เปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ

### 4.4.3 ศึกษาปริมาณของสาหร่าย *Anabaena* sp. ต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม

การทดลองการศึกษาปริมาณสาหร่าย *Anabaena* sp. ที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม พบว่า ปริมาณสาหร่ายที่แตกต่างกันมีผลทำให้การดูดซับต่างกัน โดยเมื่อสาหร่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ดูดซับได้ต่อเซลล์สาหร่ายลดลง โดยที่ปริมาณสาหร่าย 0.1 กรัม สามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในสารละลายได้ 6.78 และ 8.30 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 4-10) คิดเป็นร้อยละ 67.83 และ 82.97 (ภาพที่ 4-11) สอดคล้องกับการศึกษาของ อทิตยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ (2553) พบว่า ปริมาณเซลล์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว ของ *Stigonema* sp. ที่ปริมาณแตกต่างกันมีผลทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพแตกต่างกันโดยเมื่อเซลล์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณตะกั่วที่ดูดซับได้ต่อเซลล์ไซยาโนแบคทีเรียลดลง



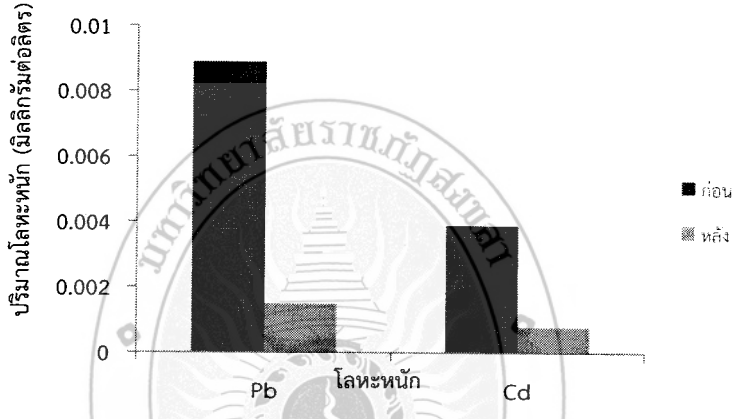

**ภาพที่ 4-10** ปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ปริมาณสาหร่ายต่าง ๆ




**ภาพที่ 4-11** เปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ปริมาณสาหร่ายต่าง ๆ

**4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของ *Anabaena* sp. ในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้ง**

การทดลองศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่าย *Anabaena* sp. ในการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา พบว่า ในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา มีความเข้มข้นของตะกั่ว และแคดเมียมลดน้อยลง โดยความเข้มข้นก่อนการดูดซับของตะกั่ว และแคดเมียมมีระดับความเข้มข้น 0.0089 และ 0.0039 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่าย *Anabaena* sp. สามารถกำจัดตะกั่ว และแคดเมียม ทำให้มีปริมาณเหลืออยู่ในน้ำเสียเพียง 0.0025±0.001 และ 0.0014±0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่ 4-12) คิดเป็นร้อยละ 83.18 และ 78.81

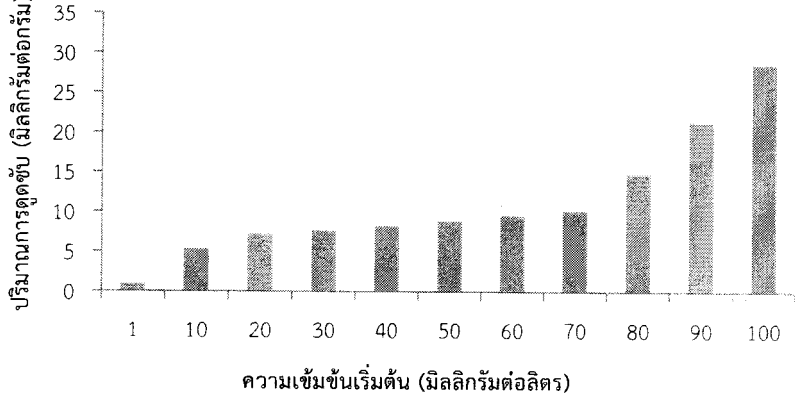



**ภาพที่ 4-12** ปริมาณตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำทิ้ง ก่อน-หลัง การดูดซับโดยสาหร่าย *Anabaena* sp.

**4.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม**

**4.6.1 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่ว**

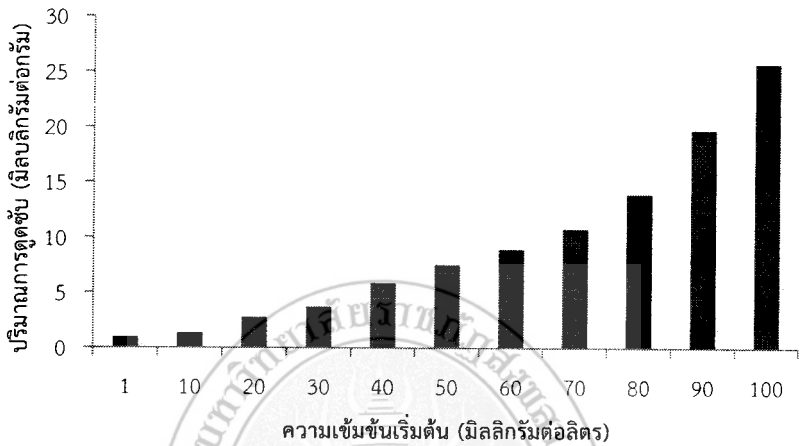
การทดลองการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่ว พบว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสาหร่าย *Anabaena* sp. ในสารละลายตะกั่วเท่ากับ 28.60 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละ 28.60 ดังแสดงใน (ภาพที่ 4-12)




**ภาพที่ 4-13** ปริมาณการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

### 4.6.2 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่ว

การทดลองการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับแคดเมียม พบว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสาหร่าย *Anabaena* sp. ในสารละลายแคดเมียมเท่ากับ 25.76 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละ 25.76 ดังแสดงใน (ภาพที่ 4-13)




**ภาพที่ 4-14** ปริมาณการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

### 4.7 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม

จากการทดลองใช้สาหร่าย *Anabaena* sp. ดูดซับโลหะหนัก ตะกั่วและแคดเมียม ที่ความเข้มข้น 1- 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสัมพันธ์ตามการศึกษา Adsorption Isotherm โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_f$ และ $q_e$ (สมการที่ 5) พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสูงกว่าจะมีจำนวนโลหะหนักที่ถูกดูดซับมากกว่า และเมื่อนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ไอโซเทอม โดยใช้สมการของแลงค์เมียร์ (Langmuir equation) และสมการของฟรุนดิช (Freundich equation) พบว่า ลักษณะกราฟของมีความสอดคล้องกับสมการ ของแลงค์เมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ค่อนข้างสูง โดยพิจารณาจากค่า R squared แสดงให้เห็นว่าการดูดซับโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียม โดยใช้สาหร่าย *Anabaena* sp. เป็นตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) มีความเหมาะสมกับ Langmuir Adsorption Isotherm มากที่สุด $R^2$ เท่ากับ 0.9827 และ 0.6047 ตามลำดับ (ภาคผนวก ค) ความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ 28.60 และ 25.76 มิลลิกรัมต่อกรัม เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย *Anabaena* sp. มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม

# บทที่ 5

# สรุปผล และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่าย *Anabaena* sp. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมของสาหร่าย *Anabaena* sp. และศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่าย ในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำทิ้งจากศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความขุ่น อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าเท่ากับ 12.8$\pm$0.40 NTU 29.16 $\pm$ 0.28 องศาเซลเซียส 501$\pm$31 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร 7.24$\pm$0.01 ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด ค่าบีโอดี ซีโอดี มีค่าเท่ากับ 0.0083$\pm$0.0010 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.0032$\pm$0.0004 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.75$\pm$0.16 กรัมต่อลิตร 120$\pm$60 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 256$\pm$32 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Anabaena* sp. พบว่า สูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย คือ BG-11 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสูตรอาหารที่เหมาะสม คือ 7.0 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง อยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณความเข้มแสงที่ 3,000 ลักซ์ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 15 วัน จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของสาหร่าย *Anabaena* sp. พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.0 ระยะเวลาที่เหมาะสม ต่อการดูดซับตะกั่ว คือ 150 นาที และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับแคดเมียม คือ 90 นาที และศึกษาปริมาณของสาหร่ายต่อการดูดซับตะกั่ว และแคดเมียม พบว่า ปริมาณสาหร่าย 0.1 กรัม เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับ ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบไอโซเทอม 2 แบบคือ ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช และไอโซเทอมแบบแลงค์เมียร์ พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียม สอดคล้องกับสมการของแลงค์เมียร์ที่ R squared เท่ากับ 0.9827 และ 0.6047 ค่าความสามารถดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมได้สูงสุดเท่ากับ 28.60 และ 25.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และจากการทดลองนำสาหร่ายมากำจัดน้ำทิ้ง พบว่า สามารถลดปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทิ้งศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาได้ 0.0074 และ 0.0031 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 83.18 และ 78.81

**5.2 ข้อเสนอแนะ**

5.2.1 ควรมีการศึกษาต่อเนื่องถึงการกำจัดสาหร่ายหลังจากการทำการดูดซับแล้วเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป

5.2.2 ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเพิ่มเติม เช่น อายุของสาหร่าย

5.2.3 การศึกษาครั้งนี้ยังพบโลหะหนักตะกั่ว และแคดเมียม ในปริมาณที่น้อย จึงทำการใช้สาหร่าย *Anabaena* sp. ดูดซับตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งต่อไปมีแนวโน้มจะพบปริมาณโลหะหนักตะกั่ว และแคดเมียมในปริมาณมากขึ้น หากมีโอกาสในการศึกษาสามารถทำการศึกษาการใช้สาหร่าย *Anabaena* sp. ในการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว แคดเมียม และโลหะหนักชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# บรรณานุกรม


กรมวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2547. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. มหาวิทยาลัยรังสิต. นนทบุรี

กุลธิดา สะอาด. 2557. ประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม. สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

คเชนท์ แก้วอุ่นเรือน. 2543. การศึกษาชนิดของแพลงก์ตอนพืชในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งและเผยแพร่ผ่านระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

จงกล พรมยะ. 2552. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย.(http://www.fishtech.mju.ac.th/e-learning/FA422/) เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม 2555

ชนมสุข สุขุม และดวงรัตน์ อินทร. 2553. การกำจัดไตรวาเลนซ์โครเมียมโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Rivularia* sp. และ *Stigonema minutum*. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11 มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 936-943

ณรงค์ศักดิ์ อังคะสุวพลา และคณะ. 2554. โรคพิษตะกั่ว. เข้าถึงจาก. http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php. เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2554.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธิศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. กรุงเทพฯ

ปิยบุตร วิเชียรเพริศ. 2550. การใช้สาหร่ายน้ำจืด *Oscillatoria okeni* 8549 บำบัดน้ำเสียจากฟาร์สุกรด้วยระบบ High Rate Algal Pond (HRAP). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พจนีย์ โลมรัตน์. 2549. การกำจัดสีย้อมและโลหะหนักในน้ำเสียจากการย้อมไหมโดยก้อนเห็ดเหลือทิ้ง *Pleurotus ostreatus*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. 2542. วิศวกรรมการประปาและสุขาภิบาล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภาณุมาศ พรหมเทศ. 2548.การดูดซับโลหะหนักโดยกากของเสียจากขบวนการผลิตน้ำผลไม้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2544. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. กรุงเทพฯ.

ยุวดี พีรพรพิศาล. 2549.สาหร่ายวิทยา. ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ลัดดา วงศ์รัตน์. 2544. แพลงก์ตอนพืช. ภาควิชาชีววิทยาประมง, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริพร หงส์พันธุ์ และคณะ. 2545. การพัฒนาระบบการจัดการน้ำทิ้งภายในสถาบันราชภัฏโดยใช้เทคโนโลยีสะอาด. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏนครราชสีมา

สันต์ นาตะสุวรรณ. ไม่พบปีที่พิมพ์. คู่มือปลาน้ำจืด. กรุงเทพฯ

วราภรณ์ ปานอยู่.2545. การแยกและการหาลักษณะเฉพาะของการทนอุณหภูมิสูงของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจากน้ำพุร้อนบางแหล่งบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมพงศ์ จันทร์โพธิ์ศรี. 2537. สมบัติของธาตุและนักวิทยาศาสตร์ของโลก. บริษัท ฐานบัณฑิต จำกัด. กรุงเทพฯ.

สันต์ นาตะสุวรรณ. ไม่พบปีที่พิมพ์. คู่มือปลาน้ำจืด. กรุงเทพฯ.

สุกัญญา ทิพยวัจนา. 2543. การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม ทองแดงและตะกั่วในปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2550. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria jasorvensis* และ *Microcystis aeruginosa*. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 14 เมษายน : 46 – 54.

สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ลัดดา วงศ์รัตน์ และศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2556. การดูดซับตะกั่วโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria limnetica* Lemmermann ที่มีชีวิต. การประชุมวิชาการ. สาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 6. ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.

สุวัจนา ถังมณี. 2545. การใช้สลัดจ์ส่วนเกินในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะขยะ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุมิตรา หมู่พยัตฆ์. 2545. การสำรวจและเก็บรวบรมสายพันธุ์สาหร่ายที่ผลิตพอลิเซ็กคาร์ไรด์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน. สถาบันราชภัฏนครสวรรค์.

เสานิตย์ ชอบบุญ และพัชรี หลุ่งหม่าน. 2551. การศึกษาความหลากหลายของสายพันธุ์สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีเขียวในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.

อทิยา สะพานกลาง และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. การเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สารอาหารที่ความเข้มข้นแตกต่าง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อทิยา สะพานกลาง และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. การดูดซับตะกั่วโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Stigonema* sp. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 28 : 20-30

อภิรดี เมืองเดช. 2545. การแพร่กระจายและการสะสมโลหะหนักบริเวณชุมชนชายฝั่งแม่น้ำบางปะกง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏราชนครินทร์.

APHA. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Port City Press, Washington DC. 28-261.

Ahuja, P., Gupta, R., and Saxena, R. K. 1999. $Zn^{2+}$ biosorption by *Oscillatoria anguistissima*. *Process Biochemistry*, *34*(1), 77-85.

Azizi, S. N., Hosseinzadeh Colagar, A., and Hafeziyan, S. M. 2012. Removal of Cd (II) from aquatic system using Oscillatoria sp. biosorbent. *The Scientific World Journal, 2012.* doi :10.1100/2012/347053

Celekli, A., and Bozkurt, H. 2011. Bio-sorption of cadmium and nickel ions using Spirulina platensis: Kinetic and equilibrium studies. *Desalination, 275*(1), 141-147

El-Enany, A. E., and Issa, A. A. 2000. Cyanobacteria as a biosorbent of heavy metals in sewage water. *Environmental Toxicology and Pharmacology, 8*(2), 95-101.

Gupta, V. K., Rastogi, A., Saini, V. K., and Jain, N. 2006. Biosorption of copper (II) from aqueous solutions by Spirogyra species. *Journal of Colloid and Interface Science, 296*(1), 59-63.

Katırcıoglu, H., Aslım, B., Türker, A. R., Atıcı, T., and Beyatlı, Y. 2008. Removal of cadmium (II) ion from aqueous system by dry biomass, immobilized live and heat-inactivated Oscillatoria sp. H1 isolated from freshwater (Mogan Lake). *Bioresource Technology, 99* : 4185-4191.

Miranda, J., Krishnakumar, G., and D'Silva, A. (2012). Removal of $Pb^{2+}$ from aqueous system by live *Oscillatoria laete-virens* (Crouan and Crouan) Gomont isolated from industrial effluents. *World Journal of Microbiology and Biotechnology. 28* : 3053-3065.

Naddafi, K., Nabizadeh, R., Saeedi, R., Mahvi, A. H., Vaezi, F., Yaghmaeian, K., and Nazmara, S. 2007. Biosorption of lead (II) and cadmium (II) by protonated *Sargassum glaucescens* biomass in a continuous packed bed column. *Journal of Hazardous Materials. 147* : 785-791.

Philippis De, R., Paperi, R., Sili, C., and Vincenzini, M. 2003. Assessment of the metal removal capability of two capsulated cyanobacteria, Cyanospira capsulate and Nostoc PCC7936. *Journal of Applied Phycology. 15* : 155-161.

Rehman, A., and Shakoori, A. R. 2001. Heavy metal resistance Chlorella spp., isolated from tannery effluents, and their role in remediation of hexavalent chromium in industrial waste water. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 66* : 542-547.

Ruangsomboon S., Wongrat L., Choochote S., Ganmanee M. and Saparnklang A. 2013. Effects of low pH and $Pb^{2+}$ stress on living cyanobacterium, *Phormidium angustissimum* West & G.S. West : A test of its feasibility as a living biosorbent. Journal of Applied Phycology. 25:905-911.

Ruangsomboon S. 2014. Biosorption of lead ($Pb^{2+}$) by living cyanobacterium, *Oscillatoria limnetica*Lemmermann. Academic Journal of Science. 03(02):459-469.

Singh, A., Kumar, D., and Gaur, J. P. 2008. Removal of Cu (II) and Pb (II) by Pithophora oedogonia: sorption, desorption and repeated use of the biomass. *Journal of Hazardous Materials. 152* : 1011-1019.

Tien, C. J. 2002. Biosorption of metal ions by freshwater algae with different surface characteristics. *Process Biochemistry. 38* : 605-613.

Williams, S. (1984). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (No. Ed. 14). Monotype Composition Company, Inc., USA

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# ภาคผนวก ก

## อาหารเลี้ยงสาหร่าย

1. สูตรอาหาร BG-11 Medium ( Stanier และคณะ, 1971 ) สำหรับเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีส่วนประกอบดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| $NaNO_3$ | 1.500 | กรัม |
| $K_2HPO_4.3H_2O$ | 0.040 | กรัม |
| $MgSO_4.7H_2O$ | 0.075 | กรัม |
| $CaCl_2.2H_2O$ | 0.036 | กรัม |
| Citric acid | 0.006 | กรัม |
| Ferric ammonium citrate | 0.006 | กรัม |
| EDTA,disodium magnesium salt | 0.001 | กรัม |
| $Na_2CO_3$ | 0.020 | กรัม |
| $FeCl_3$ | 0.002 | กรัม |
| Trace metal mix A5 | 1.000 | มิลลิลิตร |
| Deionized water | 1000 | มิลลิลิตร |

Trace metal mix A5

| | | |
|---|---|---|
| $H_3BO_3$ | 2.860 | กรัมต่อลิตร |
| $MnCl.4H_2O$ | 1.810 | กรัมต่อลิตร |
| $ZnSO_4.7H_2O$ | 0.222 | กรัมต่อลิตร |
| $NaMoO_4.2H_2O$ | 0.390 | กรัมต่อลิตร |
| $CuSO_4.5H_2O$ | 0.079 | กรัมต่อลิตร |
| $Co(NO_3)_2.6H_2O$ | 0.049 | กรัมต่อลิตร |

พีเอช 7.1

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

นำสารทั้งหมดมาละลายด้วยน้ำกลั่น ฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

2. สูตรอาหาร BGA Medium (เสาวนิตย์ และพัชรี ,2551 อ้างจาก Antarikanonda,1980) สำหรับเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีส่วนประกอบดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| NaCl | 0.070 | กรัม |
| $MgSO_4.7H_2O$ | 0.380 | กรัม |
| $CaCl_2$ | 0.080 | กรัม |
| $K_2HPO_4$ | 0.600 | กรัม |
| $Fe_2(SO_4)_3.6H_2O$ | 0.010 | กรัม |
| Titriplex III | 0.027 | กรัม |
| $H_3BO_3$ | 0.003 | กรัม |
| $MnSO_4.4H_2O$ | 0.002 | กรัม |
| $Na_2MoO_4.2H_2O$ | 0.008 | กรัม |
| $ZnSO_4.7H_2O$ | 0.0003 | กรัม |
| $CuSO_4.5H_2O$ | 0.00008 | กรัม |
| $CoCl_2$ | 0.00002 | กรัม |
| Deionized water | 1000 | มิลลิลิตร |

พีเอช 7.1

ละลายส่วนประกอบทั้งหมด ผสมกับน้ำกลั่น นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 15 นาที

หมายเหตุ สูตรอาหาร BGA+N เตรียมโดยการเติมโซเดียมไนเตรต 1.5 กรัมต่อลิตร

3. สูตรอาหาร Allen's Medium (เสาวนิตย์ และพัชรี,2551 อ้างจาก Allen,1952) สำหรับเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีส่วนประกอบดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| $NaNO_3$ | 1.500 | กรัม |
| $K_2HPO_4.3H_2O$ | 0.040 | กรัม |
| $MgSO_4.7H_2O$ | 0.075 | กรัม |
| $Na_2CO_3$ | 0.020 | กรัม |
| $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ | 0.020 | กรัม |
| $Na_2SiO_3.9H_2O$ | 0.058 | กรัม |
| EDTA | 0.001 | กรัม |
| Citric acid | 0.006 | กรัม |
| $FeCl_3$ | 0.002 | กรัม |
| Trace metal mix A5 | 1.000 | มิลลิลิตร |
| Deionized water | 1000 | มิลลิลิตร |

Trace metal mix A5

| | | |
|---|---|---|
| $H_3BO_3$ | 2.860 | กรัมต่อลิตร |
| $MnCl.4H_2O$ | 1.810 | กรัมต่อลิตร |
| $ZnSO_4.7H_2O$ | 0.222 | กรัมต่อลิตร |
| $NaMoO_4.2H_2O$ | 0.390 | กรัมต่อลิตร |
| $CuSO_4.5H_2O$ | 0.079 | กรัมต่อลิตร |
| $Co(NO_3)_2.6H_2O$ | 0.049 | กรัมต่อลิตร |

พีเอช 7.1

นำสารทั้งหมดมาละลายด้วยน้ำกลั่น ฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

4. สูตรอาหาร NS III Medium (เสาวนิตย์ และพัชรี, 2551 อ้างจาก Payer,1970-1971) สำหรับเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีส่วนประกอบดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| 1.0 M $KNO_3$ | 10 | มิลลิกรัม |
| 1.5 M $KH_2PO_4$ | 2 | มิลลิกรัม |
| 0.25 M $MgSO_4.7H_2O$ | 2 | มิลลิกรัม |
| 0.05 M $CaCl_2.2H_2O$ | 2 | มิลลิกรัม |
| 0.5 M NaCl | 0.1 | มิลลิกรัม |
| Micro A | 2 | มิลลิกรัม |
| Micro B (Manganese) | 2 | มิลลิกรัม |
| Micro C (Iron-EDTA) | 2 | มิลลิกรัม |

Stock solution of Microelements

Micro A

| | | |
|---|---|---|
| Solution A.1 | 200 | มิลลิกรัม |
| Solution A.2 | 2 | มิลลิกรัม |
| น้ำกลั่น | 798 | มิลลิกรัม |

Solution A.1

| | | |
|---|---|---|
| KBr | 595 | มิลลิกรัม |
| KI | 415 | มิลลิกรัม |
| LiCl | 21.2 | มิลลิกรัม |
| $H_3BO_3$ | 77 | มิลลิกรัม |

ละลายส่วนประกอบทั้งหมดในน้ำกลั่น 1 ลิตร จากนั้นปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 มิลลิกรัม

Solution A.2

| | | |
|---|---|---|
| $ZnSO_4.7H_2O$ | 144 | มิลลิกรัม |
| $NiSo_4.6H_2O$ | 658 | มิลลิกรัม |
| $CuSO_4.7H_2O$ | 70 | มิลลิกรัม |
| $Al_2(SO_4)_2.18H_2O$ | 167 | มิลลิกรัม |
| $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.7H_2O$ | 4 | มิลลิกรัม |
| $HN_4VO_3$ | 29 | มิลลิกรัม |

ละลายส่วนประกอบทั้งหมดในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัม

Micro B

ละลาย MnCl2.4H2O 50 มิลลิกรัมในน้ำ 1 ลิตร แล้วปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

Micro B

ละลาย Fe(NO3).9H2O 810 มิลลิกรัม และ EDTA 750 มิลิกรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เก็บใส่ขวดสีชาไว้ในตู้เย็น

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# ภาคผนวก ข

## การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

### 1. การวิเคราะห์หาค่า BOD

หลักการ

การวิเคราะห์หาค่าบีโอดี (BOD) เป็นการวัดความสกปรกของน้ำเสียในเทอมของออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน การหาบีโอดีเป็นกระบวนการทดสอบทางชีววิทยาเพื่อหาปริมาณออกซิเจนซึ่งแบคทีเรียใช้ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะที่เหมือนกับที่เกิดในธรรมชาติที่สุด เพื่อที่จะให้การวิเคราะห์เป็นปริมาณวิเคราะห์จึงทำให้แฟคเตอร์ต่างๆที่มีอิทธิพลต่ออัตราการย่อยสลายคงที่ นั่นคือค่าบีโอดีมาตรฐานต้องบ่ม (Incubate) ที่อุณหภูมิ 20 $\pm$ 1 °C เป็นเวลา 5 วัน

วิธีวิเคราะห์ค่าบีโอดี มี 2 วิธีคือ

วิธีแบบโดยตรง

วิธีแบบเจือจาง

วิธีแบบเจือจางใช้สำหรับตัวอย่างที่มีความสกปรกมาก เช่น มีค่าบีโอดีเกิน 7 mg/l เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้น เมื่อตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์จำนวนมาก จึงต้องเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้น

วิธีการวิเคราะห์บีโอดีแบบเจือจาง

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250-300 ml
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (BOD Incubator)
- กระบอกตวง บิวเรต
- เครื่องจ่ายลม

2.สารเคมี

- น้ำกลั่น
- สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์
- สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์
- สารละลายเฟริคคลอไรด์
- สารละลายแมงกานีสซัลเฟต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

- สารละลายอัลคาไล-ไอโอไดด์-เอไซด์
- กรดซัลฟุริคเข้มข้น
- น้ำแป้ง
- สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N
- สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.0250 N
- สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 0.0250 N
- สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 0.025 N

3.วิธีการวิเคราะห์

3.1 เลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่า BOD โดยประมาณของตัวอย่างน้ำ ต้องหา COD ก่อนหรืออาจจะดูจากค่า Rapid COD พร้อมกับพิจารณาลักษณะของตัวอย่างน้ำ แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำร่วมด้วย เพื่อกะประมาณค่าบีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีค่าของแข็งละลายมาก ควรจะมีค่าบีโอดี ร้อยละ 60-70 ของซีโอดี หรือเมื่อทราบว่าเป็นน้ำเสียชุมชนก็ควรจะมีค่าบีโอดี ระหว่าง 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร การเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการใช้ออกซิเจนอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบค่าบีโอดีโดยประมาณ ควรเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้วจึงเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูงหรือต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ 8 เช่นประมาณค่าบีโอดีไว้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เลือกสูงขึ้นไป 5 มิลลิลิตร และต่ำลงเป็น 20 มิลลิลิตร

3.2 เมื่อเลือกปริมาณตัวอย่างได้แล้ว ปิเปตตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดบีโอดีขนาด 300 มิลลิลิตร อย่างละ 2 ขวด เติมน้ำเจือจางจนเต็มขวดบีโอดี ต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ ปิดฝาให้แน่น นำขวดบีโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาตรที่เลือก มาหาค่าออกซิเจนละลายที่มีเริ่มต้นสมมุติเป็น $DO_0$ ส่วนอีกขวดนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน (วิเคราะห์ตามวิธี Azide Modification )

3.3 เมื่อครบ 5 วัน นำขวดบีโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่ สมมุติเป็น $DO_5$

การคำนวณ

ค่าบีโอดี (mg/l) = ($DO_0$-$DO_5$) X อัตราส่วนเจือจาง

**ตารางที่ ข-1** การเลือกขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดีต่างๆ

| ปริมาณตัวอย่าง (ml) | ช่วงบีโอดี (mg/l) | อัตราเจือจาง |
|---|---|---|
| 0.02 | 30,000-105,000 | 15,000 |
| 0.05 | 12,000-42,000 | 6,000 |
| 0.10 | 6,000-21,000 | 3,000 |
| 0.20 | 3,000-10,500 | 1,500 |
| 0.50 | 1,200-4,200 | 600 |
| 1.0 | 600-2,100 | 300 |
| 2.0 | 300-1,050 | 150 |
| 5.0 | 120-420 | 60 |
| 10.0 | 60-210 | 30 |
| 20.0 | 30-105 | 15 |
| 50.0 | 12-42 | 6 |
| 100 | 6-21 | 3 |
| 300 | 0-7 | 1 |

## 2. การวิเคราะห์ COD

หลักการ

ภายใต้สภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟุริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์โดยสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์ วัดปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลือโดยนำไปไตรเตรตกับเฟรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate) และใช้เฟอโรอิน (Ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปแตสเซียสไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

1. เมื่อรีฟลักซ์ด้วย $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$

$$CHO + CR_2O_7^{-2} + H^+ \longrightarrow CO_2\ H_2O + Cr^{+3} + Cr_2O_7^{-2}$$

(เกินพอ) (เหลือ)

2. หาปริมาณ $Cr_2O_7^{-2}$ ที่เหลือโดยการไตรเตรตด้วย FAS มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์

$$6Fe^{+2} + Cr_2O_7^{-2} + 14H^+ \longrightarrow 6Fe^{+3} + 2Cr^{+3} + 7H_2O$$

สีเหลือง Ferroin indicator สีน้ำตาลแดง

$Cr_2O_7^{-2}$ ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ $Fe^{2+}$ (FAS)ได้โครมิค ($Cr^{+3}$) จนหมด แล้ว $Fe^{2+}$ จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอินได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไตรเตรต

วิธีการวิเคราะห์ COD

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- หลอดย่อย (Digestion vessels)
- เตาหลอด (Heater Block)
- เตาอบ (Oven)
- บิวเรต
- ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

2. สารเคมี

- สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N
- กรดซัลฟุริก และซิลเวอร์ซัลเฟต
- สารละลายมาตรฐานเฟรัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.05 N
- สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์
- กรดซัลฟามิก

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 การเลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีโอดีให้เหมาะสม

ถ้าตัวอย่างน้ำมีซีโอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25x150 มิลลิเมตร (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร) ถ้าซีโอดีค่อนข้างสูงให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20x150 มิลลิเมตร (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร) และถ้าซีโอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16x100 มิลลิเมตร (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 2.5 มิลลิลิตร)

3.2 การเลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำ

ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติหรือน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำๆ (< 40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25x150 มิลลิเมตร แต่ถ้ามีค่าซีโอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20 x 150 มิลลิเมตร โดยใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร หรือใช้น้อยกว่าแล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีโอดีสูงมากต้องเจือจางน้ำก่อนนำมาใช้ ควรประมาณค่าซีโอดีของตัวอย่างน้ำอย่างคร่าวๆก่อนเพื่อที่จะได้เลือกใช้ปริมาณตัวอย่างได้ อย่างเหมาะสม การประมาณค่าซีโอดีสามารถทำได้โดยพิจารณาจากลักษณะตัวอย่างน้ำ แหล่งที่มาของน้ำ และจากค่า Rapid COD การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จาก

ตารางที่ 8 ในทางปฏิบัติควรเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำให้ผลต่างของ FAS ที่ใช้ในการไตรเตรต แบลงค์และตัวอย่างน้ำอยู่ระหว่าง 1-5 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข-2 ขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสม

| ช่วงซีโอดี | ขนาดตัวอย่าง (ml) | อัตราเจือจาง |
|---|---|---|
| <200 | 5 | 1:1 |
| 200-400 | 4 | 1:1 |
| 400-800 | 2 | 1:1 |
| 800-1,600 | 1 | 1:1 |
| 1,600-3,200 | 5 | 1:10 |
| 2,700-5,300 | 3 | 1:10 |
| 4,000-8,000 | 4 | 1:20 |
| 8,000-16,000 | 2 | 1:20 |
| 13,000-26,500 | 3 | 1:50 |
| 20,000-40,000 | 2 | 1:50 |
| 40,000-80,000 | 2 | 1:100 |
| 80,000-160,000 | 1 | 1:100 |

*เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 N และ $K_2Cr_2O_7$ 0.1 N

3.3 ใส่น้ำตัวอย่าง

3.3.1 ใส่น้ำตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม เติมน้ำยาย่อยสลายหรือโปแตสเซียม ไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ 9 (ถ้าใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำน้อยกว่าที่แสดงไว้ในตารางให้เติมน้ำกลั่นให้ครบตามจำนวน) ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลงค์ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง

**ตารางที่ ข-3** ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

| ขนาดหลอดแก้ว (ml) | ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (ml) | สารละลายไดโครเมต (ml) | สารละลายกรดซัลฟุริก (ml) | ปริมาตรทั้งหมด (ml) |
|---|---|---|---|---|
| 16x100 | 2.5 | 1.5 | 3.5 | 7.5 |
| 20x150 | 5.0 | 3.0 | 7.0 | 15.0 |
| 25x150 | 10.0 | 6.0 | 14.0 | 30.0 |

3.3.2 วางหลอกแก้วในบล็อก แล้วใส่ตู้อบตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 $\pm$ 2 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้ว นำออกจากตู้อบปล่อยทิ้งให้เย็น

4. การทำไตรเตรชัน

เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไตรเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานFAS สีของสารละลายค่อยๆ เปลี่ยนจาก เหลืองจนเป็นสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จดปริมาณ FAS ที่ใช้ไตรเตรต

5. การคำนวณ

$$\text{COD, mgO}_2\text{/l} = \frac{(A-B) \times 8000}{\text{ml ของตัวอย่างน้ำ}}$$

เมื่อ A = mlของ FAS ที่ใช้ในการไตรเตรตแบลงค์

B = ml ของ FAS ที่ใช้ในการไตรเตรตตัวอย่างน้ำ

N = ความเข้มข้นของ FAS (N)

**3. การวิเคราะห์ ความขุ่น**

หลักการ

วิธีเนฟฟีโลเมตริกเป็นการเปรียบเทียบความเข้มของแสงที่กระจัดกระจายของตัวอย่างกับของสารมาตรฐานภายใต้สภาวะเดียวกัน ความเข้มของแสงที่กระจัดกระจายมากก็จะมีความขุ่นมาก สารละลายความขุ่นมาตรฐานที่ใช้คือ ฟอร์มาซินโพลิเมอร์ (Formazin Polymer) ประกอบด้วยสารละลาย 2 ตัวอย่างงคือ สารละลายไฮดราซีนซัลเฟต (HydrazineSulfate) กับสารละลายเฮกซาเมธิลลีน เตรตระมีน (Hexamethylene Tetramine)

วิธีวิเคราะห์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องวัดความขุ่น
- หลอดวัดตัวอย่างน้ำ

2. สารเคมี

- น้ำกลั่นที่ใสไม่มีความขุ่น
- สารละลายสต๊อกความขุ่นมาตรฐาน

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 เปิดเครื่องวัดความขุ่นและเตรียมเครื่องตามคู่มือการใช้และวัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างตามวิธีของเครื่องนั้นๆ

3.2 น้ำตัวอย่างต้องเขย่าให้เข้ากันดีก่อนเทใส่หลอดวัดตัวอย่างเพื่อนำไปวัดความขุ่น

3.3 ถ้าตัวอย่างน้ำมีความขุ่นเกินที่เครื่องจะวัดได้ให้เจือจางตัวอย่างน้ำลงก่อน

**4. การวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้า**

หลักการ

สภาพนำไฟฟ้า (K) เป็นการวัดความสามารถของน้ำในการนำกระแสไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของอิออนที่มีอยู่ในน้ำและอุณหภูมิขณะที่ทำการวัด สารละลายอนินทรีย์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ ส่วนสารอินทรีย์ไม่แตกตัวในน้ำจึงไม่นำไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ไมโครโมห์ต่อเซนติเมตร (Micromhos/cm) หรือไมโครซีเมนซ์ต่อเซนติเมตร (Microsiemens/cm) และเป็นส่วนกลับของสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) ค่าสภาพนำไฟฟ้านำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้ตรวจความบริสุทธิ์ของน้ำกลั่นและน้ำปราศจากอิออน ใช้เป็นดัชนีชี้นำว่าจะใช้ปริมาณตัวอย่างมากน้อยเท่าใดในการวิเคราะห์สารต่างๆ ทางเคมี เช่น วิเคราะห์คลอไรด์ ความกระด้าง ของแข็งละลาย เป็นต้น นอกจากนี้ยุงทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำดิบและน้ำเสียอย่างรวดเร็ว

วิธีวิเคราะห์

1. ทำการ Calibrate เครื่องในอากาศและตามด้วยสารละลายมาตรฐาน
2. ล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าในตัวอย่างน้ำ
3.

**5. การวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH)**

หลักการ

การวัดพีเอช คือ การวัดสภาพความเป็นกรดหรทอเป็นด่างของสารละลาย ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Solution) โดยวัดความต่างศักย์ (Potential) ที่เกิดขึ้น ระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่ได้ เกิดขึ้นจากจำนวนของไฮโดรเจนอิออน ($H^+$) อิเล็กโทรดจะเปลี่ยนความต่างศักย์ที่เกิดจากอิออน (Ionic Potential) ให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electronic Potential) แล้วขยายให้มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยเครื่องวัดพีเอช

วิธีวิเคราะห์

1. ทำการ Calibrate เครื่องด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ 7.00 4.00 และ 10.00
2. ผสมตัวอย่างให้เข้ากัน แล้ววัดค่าพีเอช

**6. การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว Pb**

หลักการ

การวิเคราะห์ตะกั่วโดยวิธี Atomic Absorption Spectrometric จะใช้พลังงานที่เกิดจากการเผา Acetylene และอากาศในการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรี (Atomization) เพื่อให้ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 283.2 นาโนเมตร (Lawal *et al.*, 2010)

วิธีการวิเคราะห์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
- เครื่องแก้ว

2. สารเคมี

- น้ำกลั่นที่ปราศจากตะกั่ว ใช้สำหรับเตรียมน้ำยาเคมี เตรียมสารละลายมาตรฐาน และการเจือจางตัวอย่าง
- กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น
- สารละลายสต๊อกตะกั่ว (Stock Lead Solution)

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 การเตรียมตัวอย่าง ให้เตรียมตัวอย่างตามความต้องการว่าจะวิเคราะห์ในรูปแบบใด ถ้าวัดในรูปละลายน้ำต้องทำการกรองตัวอย่างน้ำก่อนนำไปย่อยด้วยกรดไนตริก

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน เตรียมสารละลายมาตรฐานตามช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมอย่างน้อย 4 ระดับ เช่น 0.2 0.4 0.6 และ0.8 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1.5 มิลลิลิตรต่อลิตร

3.3 การเตรียมเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทำกราฟมาตรฐานแล้วนำตัวอย่างเข้าวัด

## 8. การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม Cd

หลักการ

การวิเคราะห์ตะกั่วโดยวิธี Atomic Absorption Spectrometric จะใช้พลังงานที่เกิดจากการเผา Acetylene และอากาศในการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรี (Atomization) เพื่อให้ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 228.7 นาโนเมตร (Katircioglu *et al.*, 2008)

วิธีการวิเคราะห์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
- เครื่องแก้ว

2. สารเคมี

- น้ำกลั่นที่ปราศจากแคดเมียม ใช้สำหรับเตรียมน้ำยาเคมี เตรียมสารละลายมาตรฐาน และการเจือจางตัวอย่าง
- กรดไนตริก (Nitric Acid) เข้มข้น
- สารละลายสต๊อกแคดเมียม (Stock Cadmium Solution)

3. วิธีวิเคราะห์

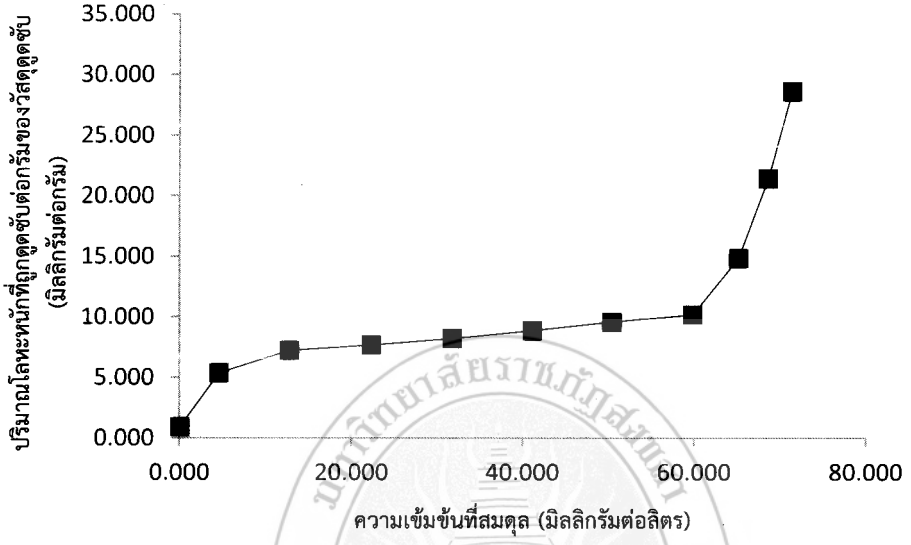
3.1 การเตรียมตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับว่าต้องการวัดละลายน้ำทั้งหมด หรือโลหะแขวนลอย ซึ่งจะใช้วิธีย่อยด้วยกรดไนตริก-ซัลฟุริก

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับต้องการค่าละเอียดแค่ไหนและความสามารถของเครื่องที่จะวัดได้ เตรียมสารละลายมาตรฐานอย่างน้อย 4 ตัวอย่างให้มีความเข้มข้น 0.2 0.4 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมกรดไนตริกเข้มข้น 0-15 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร ให้กับสารละลายมาตรฐาน

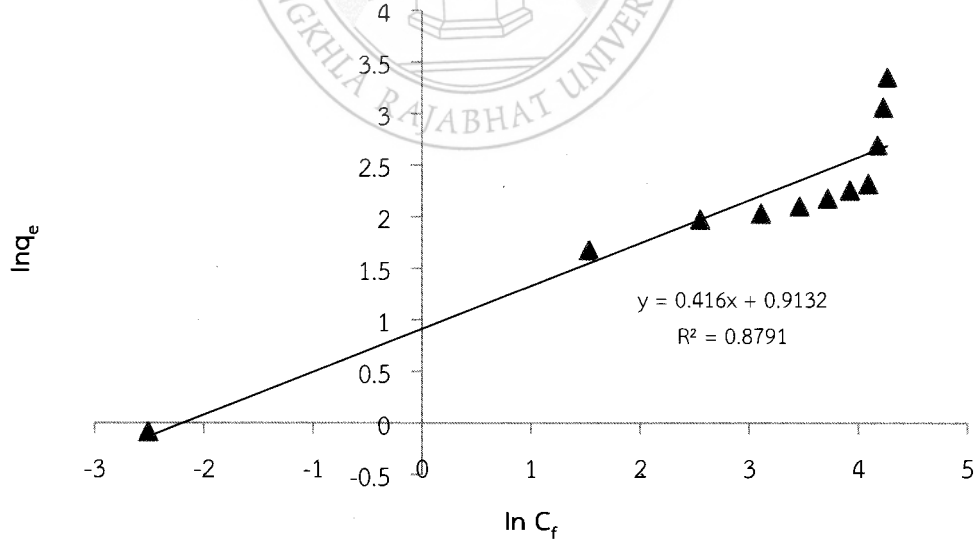
3.3 การเตรียมเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทำกราฟมาตรฐานแล้วนำตัวอย่างเข้าวัด

# ภาคผนวก ค

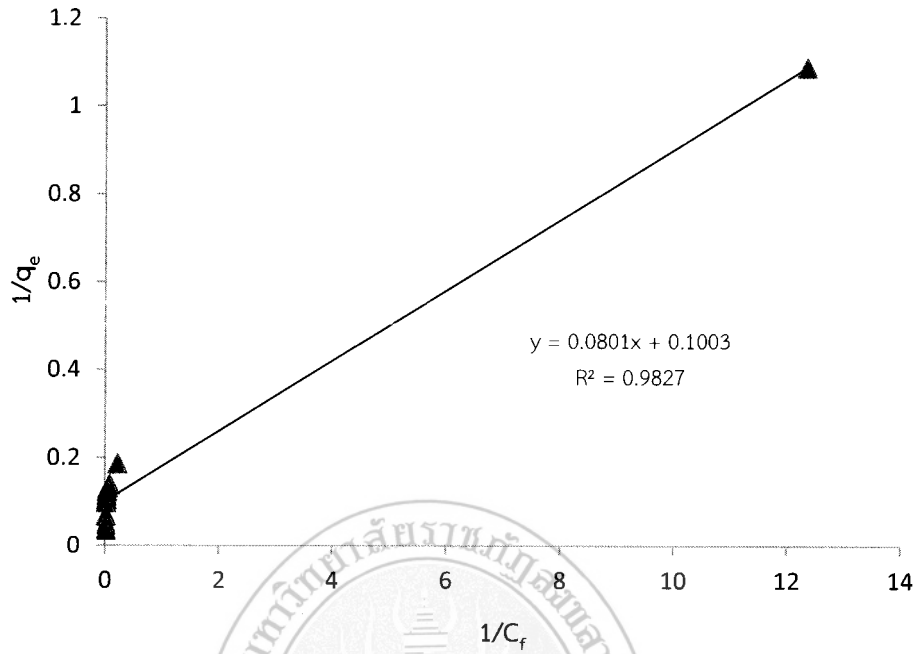
## ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว




**ภาพที่ ค-1** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง q กับ ของสารละลายตะกั่ว



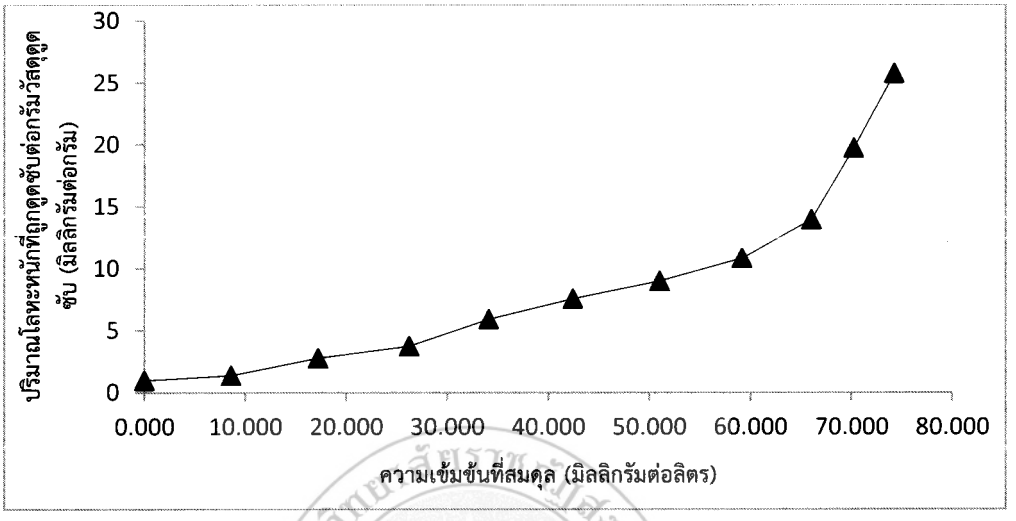

**ภาพที่ ค-2** กราฟแสดงการวิเคราะห์สมการฟรุนดิชของสารละลายตะกั่ว



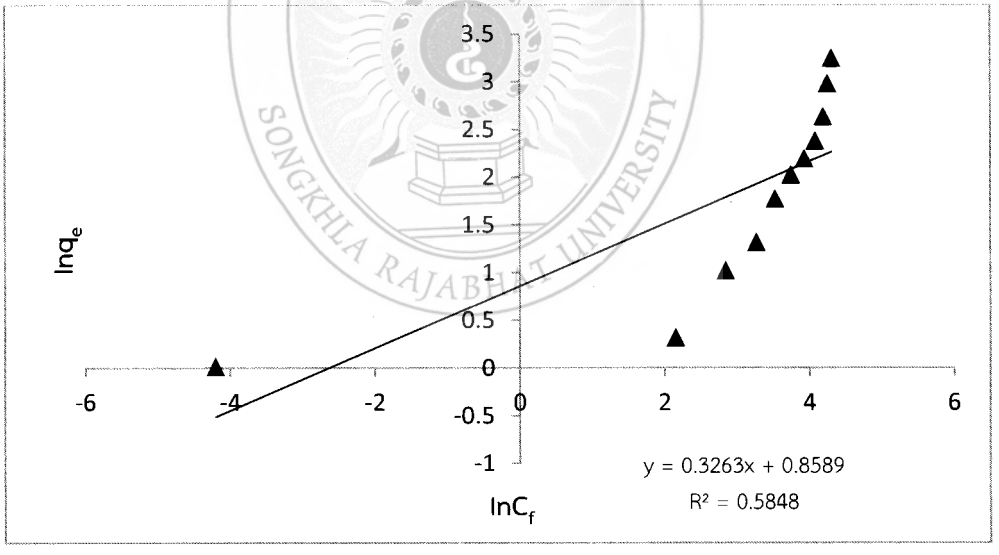

**ภาพที่ ค-3** กราฟแสดงการวิเคราะห์สมการแลงค์เมียร์ของสารละลายตะกั่ว

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

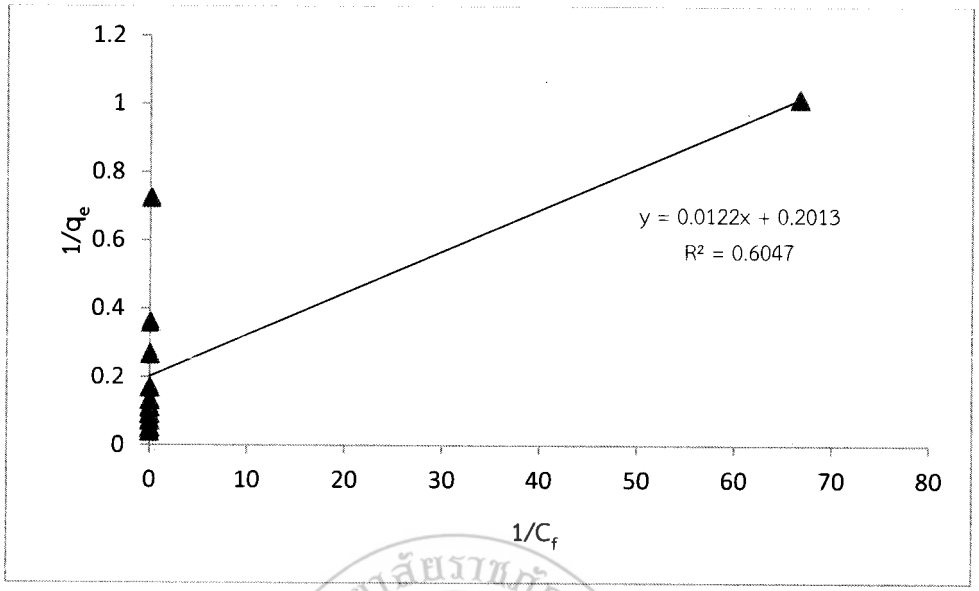
ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม




**ภาพที่ ค-4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง $q_e$ กับ $C_f$ ของสารละลายแคดเมียม




**ภาพที่ ค-5** กราฟแสดงการวิเคราะห์สมการฟรุนดิชของสารละลายแคดเมียม




**ภาพที่ ค-6** กราฟแสดงการวิเคราะห์สมการแลงค์เมียร์ของสารละลายแคดเมียม

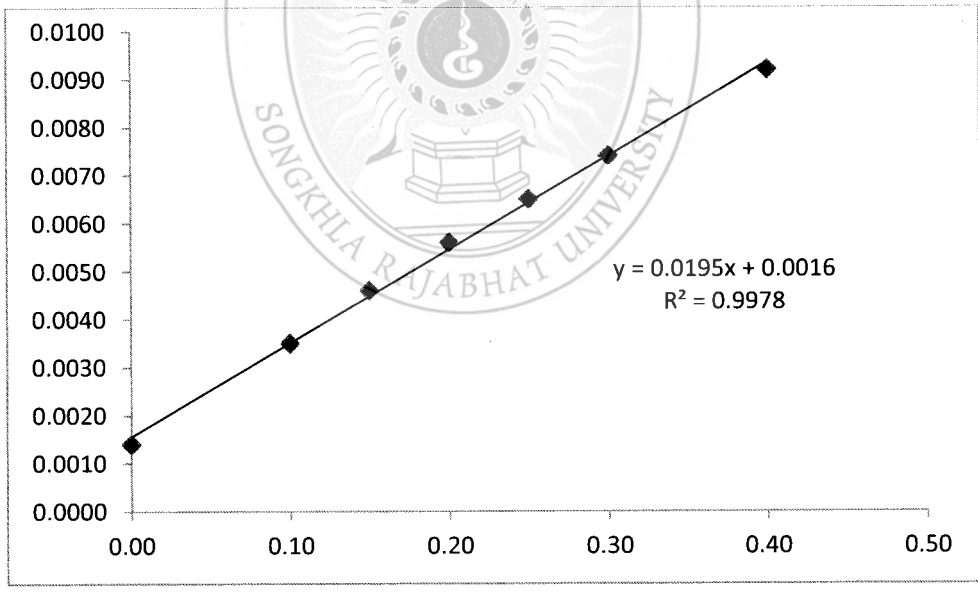
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

# ภาคผนวก ง

## การแสดง Calibration Curve ของ ตะกั่ว และแคดเมียม

**ตารางที่ ง-1** แสดง Calibration Curve ของ ตะกั่ว

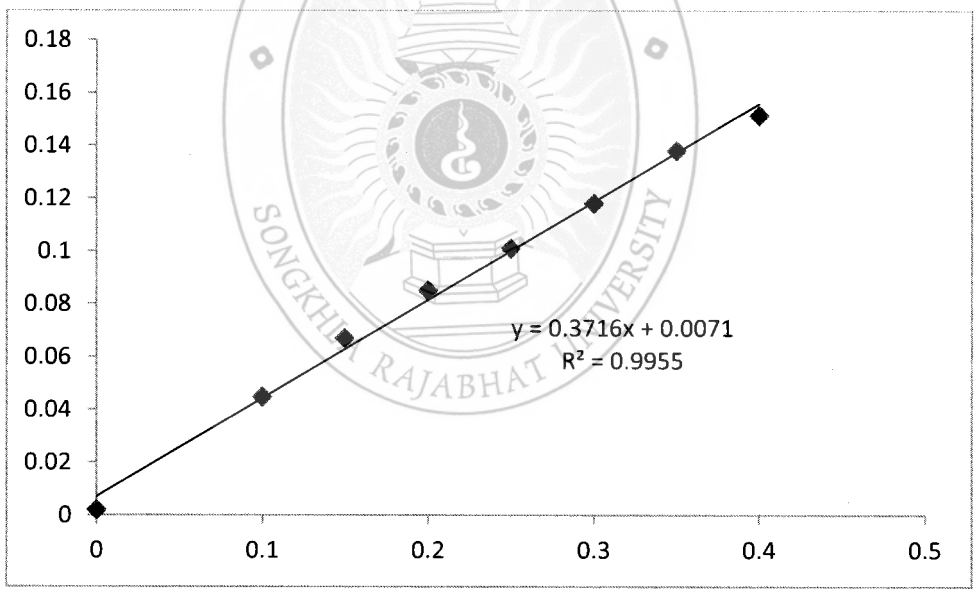
| ความเข้มข้นของ ตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร) | Absorbance |
|---|---|
| 0.00 | 0.0014 |
| 0.10 | 0.0035 |
| 0.15 | 0.0046 |
| 0.20 | 0.0056 |
| 0.25 | 0.0065 |
| 0.30 | 0.0074 |
| 0.40 | 0.0092 |




**ภาพที่** ง-1 แสดงความเป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานของโลหะตะกั่ว

**ตารางที่ ง-2** แสดง Calibration Curve ของ แคดเมียม

| ความเข้มข้นของ ตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร) | Absorbance |
|---|---|
| 0.00 | 0.002 |
| 0.10 | 0.045 |
| 0.15 | 0.067 |
| 0.20 | 0.085 |
| 0.25 | 0.101 |
| 0.30 | 0.118 |
| 0.35 | 0.138 |
| 0.40 | 0.151 |




**ภาพที่ ง-2** แสดงความเป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานของโลหะแคดเมียม

# ภาคผนวก จ

## Adsorption capacity

**ตารางที่ จ-1** แสดงค่าความเป็นกรดด่าง ในการดูดซับ ตะกั่ว ของสาหร่าย *Anabaena* sp.

| ค่าความเป็นกรดด่าง | Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ) |
|---|---|
| 5 | 2.785±0.249 |
| 6 | 2.181±0.178 |
| 7 | 1.645±0.189 |
| 8 | 1.388±0.366 |
| 9 | 0.386±0.060 |

**ตารางที่ จ-2** แสดงค่าความเป็นกรดด่าง ในการดูดซับ แคดเมียม ของสาหร่าย *Anabaena* sp.

| ค่าความเป็นกรดด่าง | Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ) |
|---|---|
| 5 | 3.205±0.015 |
| 6 | 3.163±0.008 |
| 7 | 3.158±0.009 |
| 8 | 3.133±0.020 |
| 9 | 3.140±0.027 |

**ตารางที่ จ-3** แสดงค่าระยะเวลาสัมผัส ในการดูดซับ ตะกั่ว ของสาหร่าย *Anabaena* sp.

| ระยะเวลาสัมผัส | Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ) |
|---|---|
| 30 นาที | 2.819±0.279 |
| 60 นาที | 2.866±0.211 |
| 90 นาที | 2.964±0.259 |
| 120 นาที | 3.145±0.039 |
| 150 นาที | 3.280±0.019 |
| 180 นาที | 3.133±0.058 |

**ตารางที่ จ-4** แสดงค่าระยะเวลาสัมผัส ในการดูดซับ แคดเมียม ของสาหร่าย *Anabaena* sp.

| ระยะเวลาสัมผัส | Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ) |
|---|---|
| 30 นาที | 3.231±00.023 |
| 60 นาที | 3.244±0.002 |
| 90 นาที | 3.284±0.011 |
| 120 นาที | 3.246±0.025 |
| 150 นาที | 3.238±0.012 |
| 180 นาที | 3.243±0.006 |

**ตารางที่ จ-5** แสดงค่าปริมาณสาหร่าย ในการดูดซับ ตะกั่ว ของสาหร่าย *Anabaena* sp.

| ปริมาณสาหร่าย | Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ) |
|---|---|
| 0.1 กรัม | 6.783±0.309 |
| 0.2 กรัม | 3.180±0.405 |
| 0.3 กรัม | 1.589±0.189 |
| 0.4 กรัม | 1.033±0.144 |

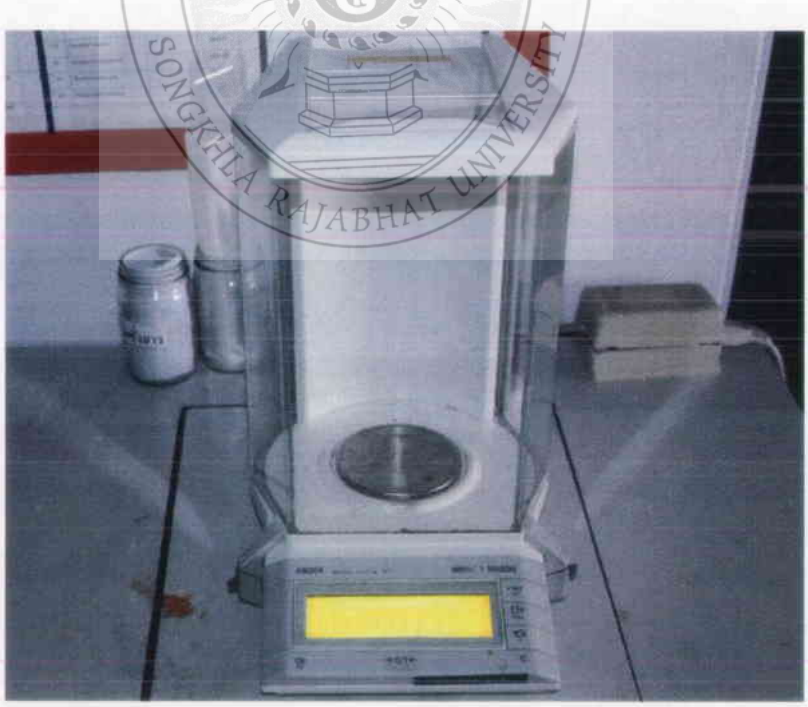
**ตารางที่ จ-6** แสดงค่าปริมาณสาหร่าย ในการดูดซับ แคดเมียม ของสาหร่าย *Anabaena* sp.

| ปริมาณสาหร่าย | Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ) |
|---|---|
| 0.1 กรัม | 8.297±0.239 |
| 0.2 กรัม | 4.023±0.125 |
| 0.3 กรัม | 2.667±0.126 |
| 0.4 กรัม | 1.852±0.199 |

# ภาคผนวก ฉ

## อุปกรณ์เครื่องมือ

**ภาพที่ ฉ-1** เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer



**ภาพที่ ฉ-2** เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

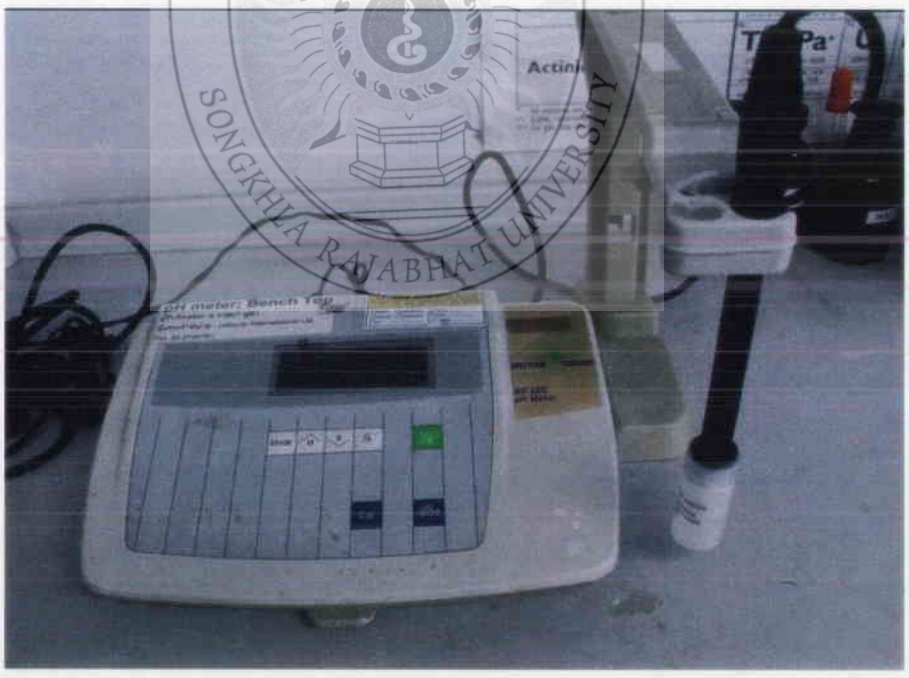
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

**ภาพที่ ฉ-3** เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง

**ภาพที่ ฉ-4** เครื่องเขย่า

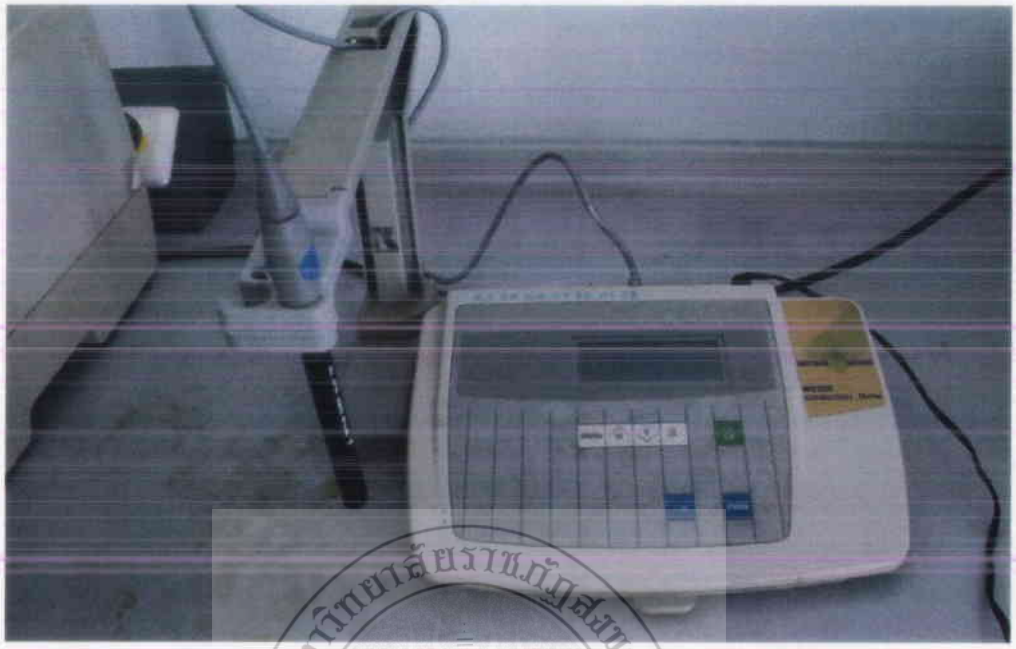
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

**ภาพที่ ฉ-5** เครื่องวัดความขุ่น



**ภาพที่ ฉ-6** เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง

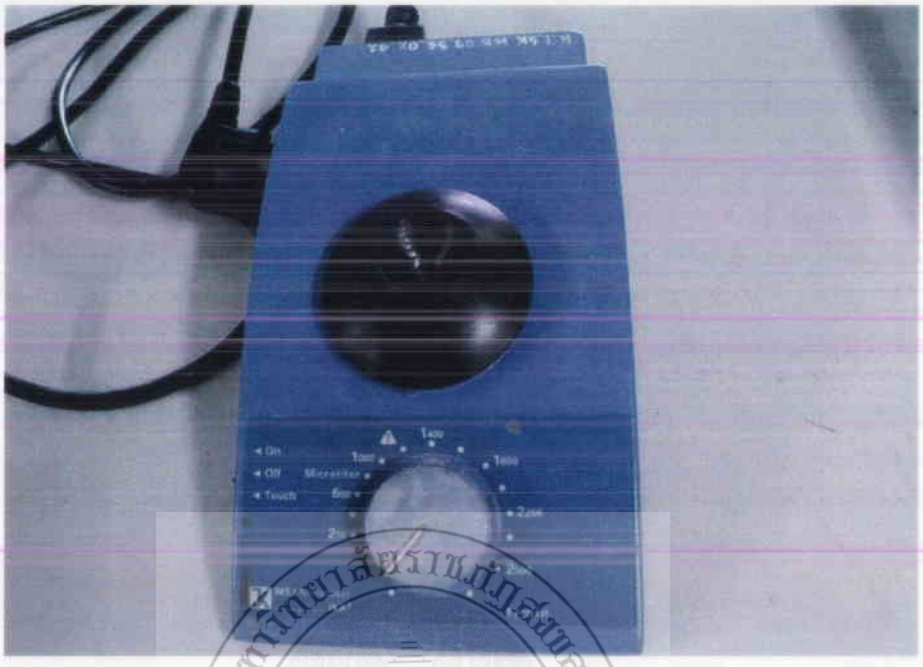
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY



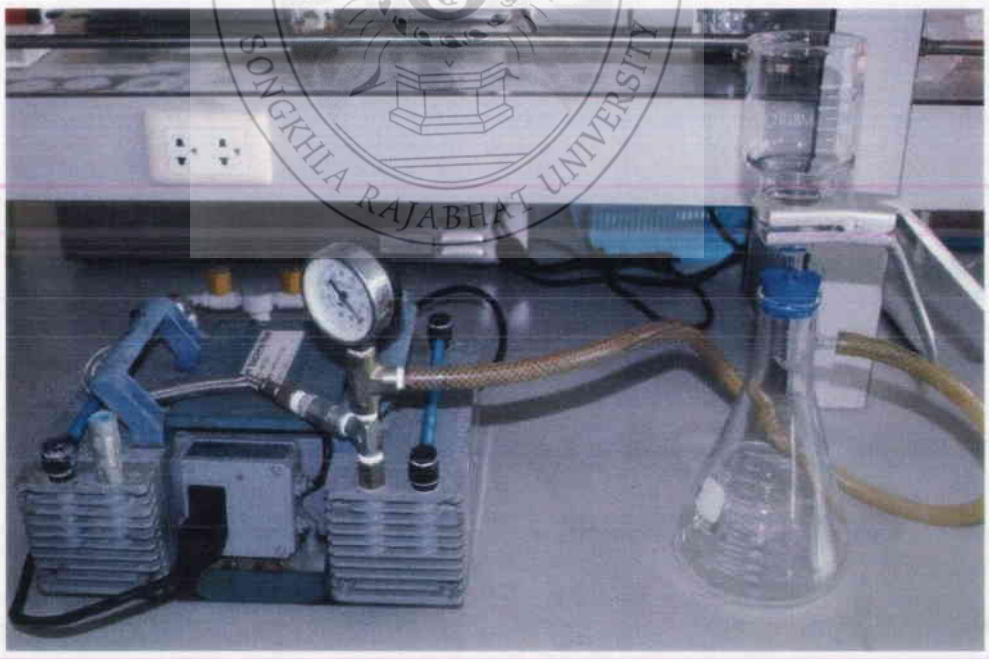
**ภาพที่ ฉ-7** เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

**ภาพที่ ฉ-8** ตู้อบลมร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY



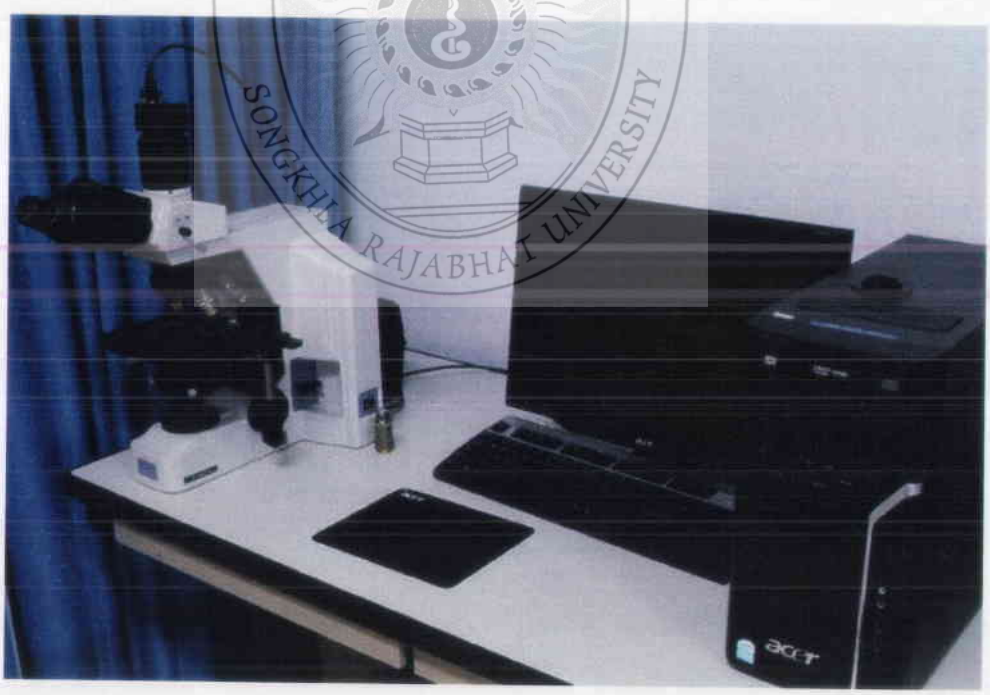
**ภาพที่ ฉ-9** เครื่องเขย่าหลอดทดลอง



**ภาพที่ ฉ-10** เครื่องกรอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

**ภาพที่ ฉ-11** เครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว




**ภาพที่ ฉ-12** กล้องจุลทรรศน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

**ภาพที่ ฉ-13** กระดาษกรอง GF/C

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY