



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรจารย์ประมง)
ปริญญา

..... วิทยาศาสตร์การประมง สาขา
..... ชีววิทยาประมง ภาควิชา

เรื่อง ประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในการดูดซับโลหะหนัก
ในระบบการเลี้ยงกุ้ง

Efficiency of Gut Weed (*Ulva intestinalis* Linnaeus) in Heavy Metals Absorption in
Shrimp Culture System

นามผู้วิจัย นางสาวกมลพรรณ ไชยทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(..... รองศาสตราจารย์ชัชวีร์ แก้วสุรลิขิต, M.S.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(..... รองศาสตราจารย์ชอล ลิ้มสุวรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(..... รองศาสตราจารย์จารุมาศ เมฆสัมพันธ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา
(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ วีระไวทยะ, M.Sc.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(..... รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในการดูดซับโลหะหนัก
ในระบบการเลี้ยงกุ้ง

Efficiency of Gut Weed (*Ulva intestinalis* Linnaeus) in Heavy Metals Absorption in Shrimp
Culture System

โดย

นางสาวกมลพรรณ ไชยทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรจารย์การประมง)

พ.ศ. 2552

กมลพรรณ ไชยทอง 2552: ประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในการดูดซับโลหะหนักในระบบการเลี้ยงกุ้ง ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การประมง) สาขาวิทยาศาสตร์การประมง ภาควิชาชีววิทยาประมง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชัชวี แก้วสุรลิขิต, M.S. 138 หน้า

การศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในการดูดซับโลหะหนัก ทำการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการและในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 0, 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายสารหนู 0, 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในโหลทดลองที่มีสาหร่ายไส้ไก่ปริมาณ 150 กรัม ในน้ำปริมาตร 3 ลิตร เป็นเวลา 6 วัน โดยสาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับปริมาณแคดเมียมได้มากกว่าปริมาณแคดเมียมที่มีในน้ำ 7.3-446.0 เท่า และมีอัตราการสะสมสารหนู 7.9-771.3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อวัน จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ปรอท ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม และสารหนู ของสาหร่ายในระบบการเลี้ยงกุ้งในพื้นที่ภาคใต้ตอนบน โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายและน้ำทุก 15 วัน เก็บตัวอย่างดินทุก 30 วัน (กรกฎาคม 2551 ถึงมีนาคม 2552) นำมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยวิธี ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) พบว่า มีการสะสมของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดในทุกตัวอย่าง โดยโลหะหนักที่ตรวจพบในดินตะกอน มีปริมาณสังกะสีสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ตะกั่ว สารหนู ปรอท และแคดเมียม ตามลำดับ ในน้ำมีปริมาณสารหนูและปรอทสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง ปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายไส้ไก่มีค่าสูงสุดในช่วงที่สาหร่ายมีมวลชีวภาพสูงสุดภายในบ่อ ในวันที่ 14-28 โดยสาหร่ายไส้ไก่มีปริมาณปรอท 3.1-10.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตะกั่ว 12.3-834.7 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง สังกะสี 307.0-4,170.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แคดเมียม 6.1-10.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และสารหนู 45.0-2,713.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยสาหร่ายไส้ไก่มีค่า concentration factor ในการดูดซับตะกั่วได้สูงสุดเท่ากับ 834.7 เท่า และมีค่า concentration factor ในการดูดซับสังกะสี สารหนู แคดเมียม และปรอท เท่ากับ 627.8, 271.3, 10.4 และ 10.4 เท่า ตามลำดับ

Kamonpan Chaitong 2009: Efficiency of Gut Weed (*Ulva intestinalis* Linnaeus) in Heavy Metals Absorption in Shrimp Culture System. Master of Science (Fisheries Science), Major Field: Fisheries Science, Department of Fishery Biology.
Thesis Advisor: Associate Professor Chatcharee Kaewsuralikhit, M.S. 138 pages.

Efficiency of gut weed (*Ulva intestinalis* Linnaeus) in heavy metal assimilation in both laboratory conditions and shrimp ponds was investigated. In laboratory conditions, 150 grams of *U. intestinalis* was added into 3 liters of seawater with different concentrations of cadmium (Cd): 0, 5, 10 and 20 µg Cd/L. Gut weed was also added in to seawater with different concentrations of arsenic (As): 0, 10, 50 and 100 µg As/L. The concentration factors of Cd assimilated by *U. intestinalis* was 7.3-446.0 and As accumulation by *U. intestinalis* was 7.9-771.3 µg/kg dry weight/day. Efficiency of *U. intestinalis* in heavy metal (mercury (Hg), lead (Pb), zinc (Zn), Cd and As) assimilations was investigated in a shrimp culture system in upper southern of Thailand. *U. intestinalis* and water samples were collected twice a month and sediment samples were collected monthly between November 2008-March 2009. The heavy metals in all samples were analyzed by ICP-MS (Inductively Coupled Plasma -Mass Spectrometry). All heavy metals in the sediments, Hg, Pb, Zn, Cd and As, were observed with the highest concentration of Zn followed by Pb, As, Hg and Cd, respectively. As and Hg were found in water samples at higher concentrations than other heavy metals and exceeded the standard levels for coastal water quality. The highest concentrations of heavy metal in *U. intestinalis* was observed in the same period of highest biomass of gut weed at the days 14-28. The concentration of Hg, Pb, Zn, Cd and As were 3.1-10.4, 12.3-834.7, 307.0-4,170.0, 6.1-10.4 and 45.0-2,713.0 µg/kg dry weight, respectively. The highest concentration factor of Pb assimilated by *U. intestinalis* was 834.73, while the highest concentration factors of Zn, As, Cd and Hg were 627.8, 271.3, 10.4 and 10.4, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ชัยศรี แก้วสุรลิขิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ชลอ ลี้มสุวรรณ และรองศาสตราจารย์ ดร. จารุมาศ เมฆสัมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการปฏิบัติงานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ มัทนา แสงจินดาวงษ์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉรี เรืองเดช ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน ที่สนับสนุนการสอบและให้คำแนะนำ แก่ใจจนวิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อน และน้องๆ ที่ศูนย์วิจัยธุรกิจเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทุกคน สำหรับมิตรภาพและน้ำใจอันมีค่ายิ่ง อีกทั้งความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัย ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อสมเพชร ไชยทอง คุณแม่กฤษณะ ไชยทอง สำหรับความรัก ความเข้าใจที่สนับสนุนลูกตลอดมา ขอขอบใจ คุณอัจฉราพรรณ และคุณอัจฉริยา ไชยทอง น้องสาว ที่เป็นกำลังใจให้เสมอมา จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จด้วยดี

กมลพรรณ ไชยทอง

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	38
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	116
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	119
ภาคผนวก	129
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	138

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณโลหะหนักที่พบในตัวอย่างน้ำทะเลกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง และสถานีที่มีค่าเกินค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง	17
2	ปริมาณโลหะหนัก (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักเปียก) ที่พบในตัวอย่างสัตว์น้ำแต่ละชนิด	23
3	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำทะเลและในสาหร่าย และค่า concentration factors	25
4	ปริมาณเฉลี่ยของ Cd Cu Hg และ Pb ในน้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร) สาหร่าย <i>Enteromorpha</i> spp. และ <i>Porphyra</i> spp. (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และค่า concentration factor ของ Cd Cu Hg และ Pb ในสาหร่าย <i>Enteromorpha</i> spp. และ <i>Porphyra</i> spp. จากบริเวณชายฝั่ง 3 แห่ง	27
5	ความเข้มข้นของโลหะหนักในสาหร่าย <i>Ulva lactuca</i> (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร) และในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	29
6	ปริมาณโลหะหนักที่พบในตัวอย่างสาหร่าย	30
7	รายละเอียดกรอบมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินมลชีวภาพด้วยสายตา	35
8	ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำ และใน <i>U. intestinalis</i>	42
9	Concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของ <i>U. intestinalis</i>	43
10	ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำและใน <i>U. intestinalis</i>	48
11	การสะสมของสารหนูและอัตราการสะสมของสารหนูใน <i>U. intestinalis</i> ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันเมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 วัน และ 6 วัน	49
12	ค่าเฉลี่ยมลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลอง	52
13	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	56
14	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	56
15	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลอง	59
16	ปริมาณปรอทในสาหร่ายไส้ไก่ ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับปรอทของบ่อทดลอง	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่และค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ	64
18	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	66
19	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	68
20	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลอง	69
21	ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายไส้ไก่ ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของบ่อทดลอง	74
22	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่และค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ	76
23	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	78
24	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	80
25	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลอง	81
26	ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไส้ไก่ ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับสังกะสีของบ่อทดลอง	86
27	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่และค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ	88
28	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	90
29	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	91
30	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่ายของบ่อทดลอง	93
31	ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของบ่อทดลอง	94
32	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่และค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ	97
33	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	100
34	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	102
35	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
36	ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียว ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับสาร หนูของบ่อกดลอง	106
37	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวและค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละ ระดับความเข้มข้นของน้ำ	108
38	คุณสมบัติของน้ำในบ่อกวนและบ่อกดลองที่มีสาหร่ายสีเขียว	115
ตารางผนวกที่		
1	คุณสมบัติของน้ำในบ่อกวนและบ่อกดลองที่มีสาหร่ายสีเขียว	130
2	ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียว มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว และปริมาณปรอทที่ สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อกดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่	133
3	ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียว มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว และปริมาณตะกั่วที่ สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อกดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่	134
4	ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายสีเขียว มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว และปริมาณสังกะสี ที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อกดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่	135
5	ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียว มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว และปริมาณ แคดเมียมที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อกดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่	136
6	ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียว มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว และปริมาณสารหนู ที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อกดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่	137

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สาหร่ายไส้ไก่ (<i>Ulva intestinalis</i> Linnaeus)	4
2	บ่อทดลองที่มีสาหร่ายไส้ไก่	37
3	บ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายไส้ไก่	37
4	ปริมาณแคดเมียม: (A) ใน <i>U. intestinalis</i> , (B) ในน้ำที่มี <i>U. intestinalis</i> , (C) ในน้ำที่ไม่มี <i>U. intestinalis</i> , (D) concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของ <i>U. intestinalis</i>	43
5	ปริมาณสารหนู: (A) ใน <i>U. intestinalis</i> , (B) ในน้ำที่มี <i>U. intestinalis</i> และ (C) ในน้ำที่ไม่มี <i>U. intestinalis</i>	50
6	ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลอง	53
7	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง	57
8	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับปรอทของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลอง	63
9	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง	69
10	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลอง	75

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
11	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในดิน (ไม่โครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำ (ไม่โครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง 3	82
12	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียว (ไม่โครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก) และปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำ (ไม่โครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับสังกะสีของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อทดลอง	86
13	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในดิน (ไม่โครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำ (ไม่โครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง 3	91
14	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่าย (ไม่โครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก) และปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำ (ไม่โครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อทดลอง	96
15	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดิน (ไม่โครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำ (ไม่โครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง 3	102
16	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในสาหร่าย (ไม่โครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก) และปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำ (ไม่โครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับสารหนูของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อทดลอง	106

ประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในการดูดซับโลหะหนัก ในระบบการเลี้ยงกุ้ง

Efficiency of Gut Weed (*Ulva intestinalis* Linnaeus) in Heavy Metals Absorption in Shrimp Culture System

คำนำ

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย สร้างรายได้เข้าสู่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท โดยประเทศไทยเป็นผู้นำในด้านการผลิตและส่งออกกุ้งเป็นเวลานานติดต่อกันมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 (ชลอ และพรเลิศ, 2547) ซึ่งในระยะสิบกว่าปีแรกจะเป็นการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) แต่หลังจากกุ้งกุลาดำประสบปัญหาการเจริญเติบโตช้า ผลผลิตที่ได้จึงต่ำกว่าเป้าหมาย ทำให้เกษตรกรหรือผู้ประกอบการเลี้ยงกุ้งขาดทุนเป็นจำนวนมาก ในที่สุดกรมประมงจึงได้อนุญาตให้มีการนำกุ้งขาวแวนนาไมหรือกุ้งขาวแปซิฟิก (*Litopenaeus vannamei*) เข้ามาทดลองเลี้ยงในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2545 ทำให้ผลผลิตกุ้งขาวแวนนาไมเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ผลผลิตจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำลดลงไปเรื่อยๆ โดยผลผลิตจากการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในปี พ.ศ. 2550 มีมากถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลผลิตจากกุ้งกุลาดำมีเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552)

เนื่องจากผลผลิตกุ้งเกือบทั้งหมดเพื่อการส่งออก ซึ่งจะต้องมีคุณภาพได้มาตรฐานสากล คือปลอดภัยต่อผู้บริโภค ไม่มีสารเคมีและยาปฏิชีวนะตกค้าง รวมทั้งทุกขั้นตอนในการผลิตต้องเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ทำให้เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งต้องมีการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการเลี้ยงให้มีมาตรฐานขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ราคากุ้งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 เป็นต้นมา อยู่ในระดับที่ต่ำมาก เนื่องจากหลายปัจจัย ได้แก่ ผลผลิตกุ้งที่มีเพิ่มขึ้นจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก ในขณะที่ประเทศผู้ซื้อกุ้งที่สำคัญของประเทศไทย คือ สหรัฐอเมริกา กำลังอยู่ในช่วงเศรษฐกิจถดถอย รวมทั้งค่าเงินบาทที่แข็งตัว เมื่อเปรียบเทียบกับเงินดอลลาร์สหรัฐ ทำให้เกษตรกรหรือผู้ประกอบการจำนวนมากต้องหาหนทางที่จะลดต้นทุนในการผลิต หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต เพื่อให้ต้นทุนอยู่ในระดับที่ยังสามารถประกอบเป็นธุรกิจได้ แนวทางหนึ่งที่ได้รับการยอมรับจากเกษตรกร คือ การเลี้ยงกุ้งร่วมกับสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงและสามารถเลี้ยงกุ้งได้ขนาดใหญ่ (ประยูร และคณะ,

2549; จริยวดี และคณะ, 2551; ชนัดดา และคณะ, 2551) เนื่องจากบ่อที่มีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะมีปริมาณสัคคว์หน้าดินซึ่งเป็นอาหารธรรมชาติแก่กุ้งเป็นจำนวนมาก นอกจากนั้น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินยังช่วยบำบัดดินเลนภายในบ่อหลังจากการเลี้ยง ทำให้ได้กุ้งที่แข็งแรง มีคุณภาพและ ระบบการเลี้ยงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลง

ในปัจจุบัน มีเกษตรกรจำนวนมากนำสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมาเพาะขยายพันธุ์ในบ่อเลี้ยงกุ้งในช่วงเวลาเตรียมบ่อก่อนปล่อยลูกกุ้ง เพื่อปรับสภาพแวดล้อมและเพิ่มปริมาณอาหารธรรมชาติให้แก่ลูกกุ้ง แนวโน้มการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ หรือกุ้ง ขาวแวนนาไม่ร่วมกับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในหมู่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการที่มุ่งเน้น การผลิตโดยอิงธรรมชาติ หรือต้องการผลผลิตในระดับปานกลางที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำ แต่จากการนำสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจากบ่อที่มีการเลี้ยงกุ้งกุลาดำและกุ้งขาวแวนนาไม่หลายพื้นที่มาตรวจวิเคราะห์ พบว่า ในบางพื้นที่มีการสะสมของโลหะหนักใน สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในปริมาณที่สูง (กมลพรรณ และคณะ, 2552) ซึ่งตามปกติพืชน้ำหรือสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไว้ในผนังเซลล์และเนื้อเยื่อ (Lobban and Harrison, 1994) ทำให้ปริมาณโลหะหนักในน้ำลดลง

เนื่องจากการเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่บริเวณชายฝั่งทะเลทั้งอ่าวไทยและทะเลอันดามัน รวมทั้งพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากทะเล และบางแห่ง ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม มีการนำน้ำทะเล น้ำจากแม่น้ำลำคลอง รวมทั้งน้ำบาดาลที่มีความเค็ม มาใช้ในระบบการเลี้ยง จึงมีโอกาที่จะมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น ปรอท ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาถึงประสิทธิภาพหรือความสามารถของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในการดูดซับโลหะหนัก ข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางให้แก่เกษตรกรนำไปประยุกต์ใช้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในการเลี้ยงกุ้งทะเลในพื้นที่ที่มีปริมาณโลหะหนักในดินและในน้ำในปริมาณมากให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นการป้องกันและลดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นต่อผลิตภัณฑ์กุ้งที่ต้องผ่านมาตรฐานความปลอดภัย รวมถึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของกุ้งในระบบการเลี้ยงที่อิงธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผล ให้อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งของประเทศไทยให้มีความมั่นคงและยั่งยืนตลอดไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถของสาหร่ายสีเขียวในการดูดซับโลหะหนักบางชนิดในห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำ สาหร่ายสีเขียว และดินตะกอน ในบ่อที่มีสาหร่ายสีเขียว และไม่มีสาหร่ายสีเขียวในพื้นที่เดียวกัน

การตรวจเอกสาร

สาหร่ายไส้ไก่

สาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* หรือ *Enteromorpha intestinalis*) เป็นสาหร่ายสีเขียวขนาดใหญ่ มีการจัดลำดับทางอนุกรมวิธาน ดังนี้

Division Chlorophyta

Class Chlorophyceales

Order Ulvales

Family Ulvaceae

Genus *Ulva*

Species *Ulva intestinalis* Linnaeus, 1753

สาหร่ายไส้ไก่มิ่ลักษณะทั่วไป คือ ทัลลัส (thallus) เป็นหลอดกลวงคล้ายลำไส้ มีความหนา 1 ชั้นเซลล์ มีส่วนรากยึดเกาะ เมื่อแก่อาจหลุดลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำและลอยอยู่ เป็นอิสระ เมื่อกอกเป็นต้นใหม่มีลักษณะเป็นเส้นสายที่เซลล์เรียงต่อกันเป็นแถวเดียว (uniserial) เมื่อมีการแบ่งเซลล์จะได้เป็นเส้นสายมีเซลล์หลายแถว (pluriserial) และมีความหนา 2 ชั้นของเซลล์ ซึ่งต่อมาเซลล์ทั้ง 2 ชั้นนี้จะแยกออกจากกัน เกิดเป็นหลอดกลวงตรงกลาง (กาญจนภาชน์, 2527) ในธรรมชาติ ทัลลัสสูงประมาณ 12 เซนติเมตร โดยมีรากเล็กๆยึดเกาะส่วนโคนแคบและขยายตอนบน มีสีเขียวเหลืองถึงเขียวเข้ม (Lewmanomont and Ogawa, 1995) หากเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกุ้ง อาจมีความยาวได้ถึง 1-2 เมตร (ชลอและคณะ, 2551) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus)

สาหร่ายสีเขียวแกมมาที่มีวงจรชีวิตแบบไอโซมอร์ฟิก ดิพลอปโลนติก (isomorphic diplohaplontic) โดยต้นสปอโรไฟต์ (sporophyte) จะสร้างซิวสปอร์ (zoospore) ที่มีขนาด 4 เส้น และแกมมาต (gametes) ที่มีขนาด 2 เส้น การแบ่งนิวเคลียสแบบไมโอซิส (meiosis) จะเกิดขึ้นในช่วงการสร้างสปอร์ อาจมีการสืบพันธุ์เฉพาะแบบไม้อาศัยเพศ โดยการสร้างสปอร์ที่มีขนาด 2 หรือ 4 เส้น บางครั้งอาจพบการสืบพันธุ์แบบพาร์ทิโนเจเนซิส (parthenogenesis) จากแกมมาต 2 เพศที่สามารถออกเป็นทลัสส์ใหม่ได้โดยไม่ได้ผสมกัน (กาญจนพานิช, 2527; ยูวดี, 2546) วงจรชีวิตของสาหร่ายจะใช้ระยะเวลาเพียงช่วงสั้นๆ ในการเจริญเติบโต ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมและฤดูกาล (Ohno and Critchley, 1993)

สาหร่ายสีเขียวแกมมาพบเกาะอยู่ตามบริเวณชายหาดในเขต น้ำขึ้นน้ำลง สามารถขึ้นได้บนแหล่งที่อยู่ลักษณะต่างๆ เช่น บนก้อนหิน แนวโขดหิน เปลือกหอย พื้นทราย พื้นโคลน หรือโคลนปนทราย เป็นสาหร่ายที่มักพบในน้ำกร่อยหรือในบ่อเลี้ยงปลา สามารถทนต่อความเค็มได้ในช่วงกว้าง จึงพบแพร่กระจายได้ในบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทั่วโลก ทั้งในเขตร้อน เขตอบอุ่น และเขตหนาว (Waaland, 1977) การเจริญเติบโตของสาหร่ายขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น เมื่อมีฝนตกที่บริเวณปากแม่น้ำ น้ำจืดก็จะไหลลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้ระดับความเค็มของน้ำเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้การเจริญเติบโต รวมทั้งสีและลักษณะของสาหร่ายเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยปกติสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงฤดูร้อน อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 23–26 องศาเซลเซียส ความเค็มของน้ำอยู่ในช่วง 24–30 particle salinity unit (psu) ความเข้มแสงตั้งแต่ 345–365 ลักซ์ เจริญได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจนสูง สามารถทนต่อการฝั่งแห้งในขณะน้ำลงได้ และเมื่อความเค็มของน้ำทะเลเปลี่ยนแปลงจะทำให้สาหร่ายปล่อยสปอร์ (Ohno and Critchley, 1993; Martins *et al.*, 1999) สาหร่ายสีเขียวสามารถขึ้นได้ดีในน้ำทะเลที่มีธาตุอาหารสูง หรือมีธาตุอาหารไหลเวียนตลอดเวลา (Fong *et al.*, 2004) โดยมีแสงและปริมาณธาตุอาหารในแหล่งน้ำ เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถจำกัดการเจริญของสาหร่าย (Duke *et al.*, 1986)

การนำสาหร่ายสีเขียวมาใช้ประโยชน์

มนุษย์ใช้ประโยชน์จากสาหร่ายมาเป็นระยะเวลานาน โดยใช้เป็นอาหารของมนุษย์ อาหารสัตว์ ทำปุ๋ย เป็นต้น ซึ่งสาหร่ายที่นำมาใช้มีทั้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยงและเก็บเกี่ยวจากธรรมชาติ สาหร่ายสีเขียว เป็นสาหร่ายที่มีปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการบริโภคและนำมาใช้ประโยชน์ จากการศึกษาของ Chapman (1980) อ้างโดย ณีฐารัตน์ และเขวาลักษณ์ (2529) พบว่าสาหร่ายสกุลนี้

มีน้ำ 13.6 % โปรตีน 12.4 % ไขมัน 0 % คาร์โบไฮเดรต 53.0 % เส้นใย 10.6 % และเถ้า 10.4 % และจากการศึกษาของ Morales *et al.* (2005) พบว่า สาหร่ายสกุลนี้ประกอบด้วย โปรตีน 9-14 % ether extract 2-3.6 % เถ้า 32-36 % กรดไขมัน n-3 และกรดไขมัน n-6 10.4 และ 10.9 กรัมต่อ 100 กรัมของกรดไขมันทั้งหมด โดยโปรตีนจากสาหร่ายชนิดนี้สามารถย่อยได้มากถึง 98 % และไม่พบการปนเปื้อนของแบคทีเรียเกินมาตรฐาน ไม่มีสารที่เป็นพิษจึงมีความเหมาะสมที่ใช้ในการบริโภคสำหรับมนุษย์ นอกจากนี้ Wheeler and Björnsäter (1992) ได้รายงานการศึกษาปริมาณไนโตรเจนในสาหร่าย *Ulva intestinalis* พบว่ามีปริมาณไนโตรเจน 2.0-5.5 % ของน้ำหนักแห้งซึ่งเป็นปริมาณไนโตรเจนที่สูงเหมาะแก่การนำมาใช้ประโยชน์ และจากการศึกษาของ Ohno and Critchley (1993) ในการเลี้ยงแบบธรรมชาติ พบว่าสาหร่ายไส้ไก่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ อยู่ระหว่าง 10.29-11.75 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณสูงสำหรับสาหร่ายขนาดใหญ่

ดังนั้น จึงมีการนำสาหร่ายสกุลนี้มาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ในประเทศญี่ปุ่น เกาหลี อินเดีย และอินโดนีเซีย มีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้บนเส้นเชือกเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการประกอบอาหารเนื่องจากมีกรดแอมิโนอยู่ในระดับสูง นอกจากนี้สารสกัดจากสาหร่ายยังมีคุณสมบัติทางการแพทย์ โดยเป็นสารปฏิชีวนะ สารต้านแบคทีเรีย ราและเนื้องอก (Critchley and Ohno, 1998) สาหร่ายไส้ไก่ยังเป็นอาหารสำหรับบริโภค ในหลายประเทศ เช่น จีน อเมริกา ฝรั่งเศส และชิลี มีการนำสาหร่ายชนิดนี้มาใช้ในการเตรียม aonori ซึ่งประกอบอยู่ในอาหารจานเดียวประเภทต่างๆ เช่น สลัด ซุป ลูกกึ่ง อาหารจำพวกเนื้อสัตว์ และเครื่องปรุงต่างๆ (Morales *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังมีการนำสาหร่ายไส้ไก่มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ใช้ในการเลี้ยงร่วมกับตัวอ่อนของสัตว์น้ำเพื่อใช้เป็นที่ยึดเกาะของตัวอ่อน (Wennhage and Pihl, 1994) นำมาทำอาหารให้แก่สัตว์น้ำ เช่น ลูกหอย ซึ่งจากการศึกษาของ Olivier *et al.* (1997) เลี้ยงสาหร่ายไส้ไก่ร่วมกับลูกหอย พบว่า ลูกหอยกินสาหร่ายไส้ไก่เป็นอาหารได้ดีกว่าสาหร่ายหรือพืชน้ำชนิดอื่น มีการนำสาหร่ายในสกุล *Enteromorpha* มาใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสาหร่ายมีปริมาณโพแทสเซียมและไนโตรเจนอยู่สูงมาก แร่ธาตุเหล่านี้มีส่วนเร่งการเจริญเติบโตของพืช จึงช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตอย่างพอเพียง ปุ๋ยจากสาหร่ายจะถูกนำมาใช้ในรูปของปุ๋ยสดหรือแห้ง โดยฝังลงในดินก่อนปลูกพืช หรือใส่ลงอีกครั้งเมื่อพืชงอกเป็นต้นกล้า ซึ่งพบได้ในหลายประเทศ เช่น ไช่ แลนด์ สกอตแลนด์ อังกฤษ สหรัฐอเมริกา และนิวซีแลนด์ เป็นต้น (ฉันทวรรัตน์ และเขาวลัทธิ, 2529) และสาหร่ายไส้ไก่ยังสามารถช่วยดักจับตะกอนในแหล่งน้ำให้ลดต่ำลง อีกทั้งมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้กับแหล่งน้ำ (Boyer and Fong, 2005)

ในประเทศไทย สุรรัตน์ฟาร์ม จังหวัดจันทบุรี ได้เป็นผู้ริเริ่มนำสาหร่ายไส้ไก่มาเลี้ยงร่วมกับกุ้งกุลาดำ เพื่อเพิ่มคุณภาพผลผลิต และมีผู้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายไส้ไก่ รวมถึงปัจจัยทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ ภายในบ่อที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำร่วมกับสาหร่ายไส้ไก่ พบว่าสาหร่ายไส้ไก่สามารถเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องในช่วง 45-60 วันแรก และพบว่า การเจริญเติบโตของสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อขึ้นอยู่กับปัจจัยร่วมหลายอย่าง โดยเฉพาะปัจจัยทางกายภาพ ซึ่งในบ่อที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้ดี ควรต้องมีน้ำใสเหมาะสมต่อแสงที่ส่องผ่านลงไปใต้น้ำ ดินพื้นบ่อเป็นสีน้ำตาล มีเศษก้อนหินและเปลือกหอยกระจายทั่วพื้นบ่อ เพื่อให้สาหร่ายสามารถยึดเกาะได้ และจะพบว่าสาหร่ายจะเจริญกระจายครอบคลุมทั่วทั้งบ่อ โดยเฉพาะบริเวณกองเลนกลางบ่อ ที่มีการหมุนเวียนของน้ำ ทำให้สารอาหารแพร่กระจายในชั้นน้ำและสาหร่ายสามารถดูดซับนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี และสาหร่ายไส้ไก่เจริญเติบโตได้ดีในบ่อที่ไม่มีการนำเลนออกจากบ่อในรอบที่ผ่านมา เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสม ในเลนจากการขับถ่ายของกุ้งและเศษอาหารเหลือสะสมในบ่อ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ตามวัฏจักรการหมุนเวียนของธาตุไนโตรเจน ซึ่งจะเปลี่ยนสารอินทรีย์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปสารประกอบไนโตรเจนที่สาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตได้ จึงเป็นการลดของเสียสะสมในบ่อ และลดความเป็นพิษของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน ที่จะมีความเป็นพิษต่อกุ้งในบ่อได้ (ชนัดดา และคณะ, 2551) นอกจากนี้จรรย์วดี และคณะ (2551) พบว่าปริมาณแพลงก์ตอนในบ่อที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบปกติ มีมากกว่าในบ่อที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำร่วมกับสาหร่ายไส้ไก่ แต่ปริมาณสัตว์หน้าดินในบ่อที่เลี้ยงร่วมกับสาหร่าย มีมากกว่าในบ่อปกติ ซึ่งสัตว์หน้าดินเหล่านี้จะเป็นอาหารตามธรรมชาติของกุ้งกุลาดำ และมีความสัมพันธ์กับปริมาณมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ เมื่อปริมาณสาหร่ายไส้ไก่มาก สัตว์หน้าดิน โดยเฉพาะ หอยสองฝา มีปริมาณมากด้วย เมื่อศึกษาองค์ประกอบของอาหารในกระเพาะอาหาร และลำไส้ของกุ้งกุลาดำในบ่อที่มีสาหร่ายไส้ไก่ พบเศษสาหร่ายไส้ไก่ และแพลงก์ตอนพืชชนิดต่างๆ บ่อที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำร่วมกับสาหร่ายไส้ไก่ให้ มีอัตราการรอดและผลผลิตมากกว่า บ่อที่เลี้ยงด้วยวิธีปกติ ดังนั้น สาหร่ายไส้ไก่ในบ่อเลี้ยงกุ้งจึงเป็น แหล่งสร้างอาหารธรรมชาติให้แก่กุ้งกุลาดำ เกษตรกรไม่จำเป็นต้องให้อาหารสำเร็จรูปแก่กุ้งกุลาดำในระยะแรกที่มีสาหร่ายไส้ไก่ในปริมาณมาก เป็นการลดต้นทุนในการเลี้ยง รวมทั้งเป็นการเลี้ยงแบบกึ่งเลียนแบบธรรมชาติทำให้กุ้งกุลาดำมีสุขภาพแข็งแรง เนื่องจากมีอาหารธรรมชาติสมบูรณ์ กุ้งจึงมีการเจริญเติบโตดี (ประยูร และคณะ, 2549; ชนัดดา และคณะ, 2551)

ข้อมูลเบื้องต้นและคุณสมบัติของโลหะหนัก

ธาตุต่างๆในโลกส่วนใหญ่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและแร่ธาตุบางชนิดมนุษย์สังเคราะห์ขึ้น รวมทั้งสิ้นประมาณ 105 ธาตุ และในจำนวนนี้ ธาตุที่เป็นโลหะหนัก (heavy metal) มี 68 ธาตุ มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23–92 ภายในคาบที่ 4–7 ของตารางธาตุ (Encyclopaedia Britannica, 1981) เป็นโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีลักษณะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทจะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) โลหะหนักที่รู้จักกันโดยทั่วไป เช่น ไททาเนียม วานาเดียม แมงกานีส ดิบุก เหล็ก เงิน นิกเกิล ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี และปรอท (Hawley, 1977) โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในน้ำ เนื่องจากการไม่สลายตัวโดยกระบวนการทางธรรมชาติ ทำให้สามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ และถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิต โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ซึ่งจะสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต บางส่วนจะสะสมอยู่ใน ดินตะกอน สิ่งมีชีวิตจะตอบสนองต่อโลหะหนักได้แตกต่างกัน โดยระดับความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสิ่งมีชีวิตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิด ขนาดหรือปริมาณที่ได้รับ อายุ และความต้านทานของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด (สุรภี, 2530)

ชนิดของโลหะหนัก

โลหะหนักที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วย ปรอท ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม และสารหนู ซึ่งล้วนแต่เป็นมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิต หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปที่กำหนด และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มีการขยายตัวและเพิ่มจำนวนอย่างมาก และของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิต เช่น โรงงานผลิตแบตเตอรี่ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ยางรถยนต์ สีทาบ้าน สารเคมีต่างๆ รวมทั้งน้ำทิ้งจากการอุปโภคบริโภคของมนุษย์ ล้วนแต่มีส่วนที่ทำให้ปริมาณโลหะหนักเพิ่มมากขึ้นในสิ่งแวดล้อม โดยมีผลกระทบสะสมตัวทั้งในดิน น้ำ และเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหารได้ (วิกันดา, 2541) จึงได้มีการตระหนักถึงโทษจากพิษของโลหะหนัก ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐาน ของโลหะหนักที่ไม่ให้มีค่าเกินกำหนด เช่น ในน้ำทะเลชายฝั่ง สิ้นค้าสัตว์น้ำในการบริโภคและส่งออก เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2549; กองตรวจสอบและรับรองมาตรฐานสินค้าและผลิตภัณฑ์ สัตว์น้ำ, 2552) ซึ่งโลหะหนักที่ได้ทำการศึกษานี้ล้วนแต่เป็น ชนิดที่ต้องเฝ้าระวังและมีค่ากำหนดให้มีปริมาณได้ไม่เกินที่กำหนดเท่านั้น เนื่องจากเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อมนุษย์ โลหะหนักจึงเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องมี

การศึกษา เพื่อหาทางป้องกันและรักษาไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยมีชนิดของโลหะหนัก ที่ทำการศึกษาดังนี้

1. ปรอท (Mercury; Hg)

ปรอทเป็นธาตุโลหะชนิดหนึ่งที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง อยู่ในหมู่ II B มีน้ำหนักอะตอม 200.59 และเลขอะตอม 80 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 13.6 มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวที่ 857 และ -38.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปรอทบริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายเงิน เรียกว่า ลิกวิด ซิลเวอร์ (liquid silver) สามารถแปรสภาพเป็นของแข็งได้ แต่ก็มีค่าประจุและระเหยเป็นไอได้ ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย ความสามารถในการละลายเท่ากับ 6.4×10^{-7} กรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส ปรอทมีคุณสมบัติสะท้อนแสง เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถเชื่อมกับโลหะอื่นได้ เช่น ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) ทองคำ (Au) และโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) โดยโลหะที่เชื่อมได้ เรียกว่า อัมัลกัม (amalgam) จัดเป็นโลหะทรานซิชัน เลขออกซิเดชันที่สำคัญคือ 1+ และ 2+ ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เสถียรที่สุด (Hawley, 1977; Berman, 1980) สารประกอบของปรอทที่มีเลขออกซิเดชันเป็น 1+ เรียกสารนั้นว่า เมอร์คิวรัส (mercurous) เช่น Hg_2Cl_2 เมื่อเลขออกซิเดชันเป็น 2+ เรียกว่า เมอร์คิวริก (mercuric) โดย Hg^+ จะทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ได้เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (mercurous chloride) ซึ่งเป็นตะกอนสีขาว มีชื่อเรียกทั่วไปว่า คาโลเมล (calomel) ซึ่งนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า (electrode) ในเซลล์ไฟฟ้า (วรวิทย์, 2542)

ปรอทเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่พบอยู่ในธรรมชาติในรูปของแร่อิสระ หรือปะปนอยู่ในเนื้อหินประเภทต่างๆ เช่น หินปูนหรือหินทราย เป็นต้น อยู่ในรูปของซินนabar (cinnabar, HgS) มีสีแดงไม่ละลายน้ำ และยังพบในแร่อื่นอีก เช่น โคลราไดต์ (coloradite, HgTe) ลิฟวิงสโตนไนท์ (livingstonite, HgSb_4O_7) เป็นต้น แหล่งกำเนิดส่วนใหญ่ของปรอทในธรรมชาติมาจากการแตกสลายและหลอมละลายของหินเปลือกโลก การระเบิดของภูเขาไฟ การชะล้างของปรอทในบรรยากาศโดยน้ำฝนและไหลลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้ปรอทปะปนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณปรอทที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิต เหมืองอุตสาหกรรม คลอรีน อัลคาไลน์ แบตเตอรี่ สีทาบ้าน กระจก การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การถูแร่ การใช้ยาปราบศัตรูพืชใช้ในเทอร์โมมิเตอร์บางชนิด โดยเฉพาะที่ใช้วัดอุณหภูมิสูง เป็นต้น (Lambou, 1972)

2. ตะกั่ว (Lead; Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะสีน้ำเงินปนเทา เป็นธาตุอยู่ในหมู่ IVA ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 207.19 และเลขอะตอม 82 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 11.35 จุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 327.4 และ 1725 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในน้ำที่เป็นกรดอ่อน ละลายได้ในกรดไนตริกเจือจาง กลายเป็นไอได้ดีที่อุณหภูมิสูง นำไฟฟ้าได้ดี ดูดเสียงและคลื่นที่สั้นสะท้อนได้ดี (Hawley, 1977)

ตะกั่วเป็นธาตุโลหะที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้น้อยที่สุด การละลายจะลดลงอย่างมากโดยการเติมวัสดุปน ในดินที่มีความเป็นกรด-ด่างสูง ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟต คาร์บอเนต หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรค่อนข้างมาก การเพิ่มความเป็นกรดให้แก่ดิน จะทำให้ตะกั่วละลายได้มากขึ้น โดยธรรมชาติแล้ว ตะกั่วมีกระจายอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม บริเวณเปลือกโลกมีตะกั่วเฉลี่ยประมาณ 10-15 มิลลิกรัมต่อลิตร (พิมล และชัยวัฒน์, 2525) ตะกั่วที่พบในเปลือกโลกเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของสารประกอบ ซึ่งพบว่ากว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของสินแร่ตะกั่วปฐมภูมิ คือ สินแร่ซัลไฟด์ เป็นสารประกอบตะกั่วกำมะถัน (lead sulfide, PbS) และยังพบใน serusite (PbCO_3) anglesite (PbSO_4) vulfanite vanaderite และ pyromorfite และยังพบตะกั่วปนอยู่ในสินแร่ทองแดง แคลดเมียม สังกะสี บิสมัท สารหนู และเงิน ในปริมาณเพียงเล็กน้อย (Encyclopaedia Britannica, 1981) สารประกอบตะกั่วมี 2 ประเภท คือ สารประกอบอนินทรีย์ ในรูปของสารประกอบที่เป็นเกลือหรือออกไซด์ อีกประเภทหนึ่ง คือ สารประกอบอินทรีย์ ที่นำมาใช้มากคือ ตะกั่วอัลคิล (alkyl lead) ที่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทน ลดการสะดุดของเครื่องยนต์

ตะกั่ว เป็นวัตถุอันตรายในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมโลหะบัดกรี ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน โลหะบัดกรีใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า หม้อน้ำรถยนต์ ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์และแผงวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้โลหะตะกั่วในโรงชุบเคลือบเหล็กด้วยสังกะสี ลูกเหล็กอวนที่ใช้ในอุตสาหกรรมประมง ใช้ในการทำกระดาษตะกั่ว ท่อน้ำ แผ่นตะกั่ว ตัวพิมพ์ กระสุนปืน สะพานไฟฟ้า ทำผนัง กันรังสีในเครื่องหรือห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับปฏิกิริยาปรมาณู ใช้ตะกั่วในการทำสี และทำผงตะกั่วแดง ตะกั่วเหลือง สำหรับเคลือบภาชนะต่าง ๆ เป็นสารประกอบเคมีในรูปอุตสาหกรรมพลาสติก แก้ว

เซรามิก ยากำจัดศัตรูพืช นอกจากนี้ยังใช้ป้องกันการทะลุทะลวงของกัมมันตภาพรังสี และใช้ควบคุมความดังของเสียงเครื่องจักรกล (พิมล และชัยวัฒน์, 2525)

การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายนั้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่วทั้งในน้ำ ดิน อากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมตะกั่วลงในน้ำมันเชื้อเพลิง กว้นเป็นแหล่งแพร่กระจายตะกั่วที่สำคัญส่งผลให้มีตะกั่วเจือปนในสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการรวมกับแหล่งอื่นๆ เช่น จากโรงงานถลุงแร่ โรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีตะกั่วในบรรยากาศมากขึ้น เกิดการรวมตัวกับอนุภาคฝุ่นผงในอากาศ ถูกชะล้างลงมากับน้ำฝนสะสมอยู่ในดินและแหล่งน้ำต่อไป (สุคนธ์, 2523)

3. สังกะสี (Zinc; Zn)

สังกะสีเป็นธาตุโลหะในหมู่ IIB ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 65.37 เลขอะตอม 30 มีสีขาวแกมเทา มีความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 419.5 และ 907 องศาเซลเซียส (Harrison and Laxen, 1981) สังกะสีมีความแข็งแต่เปราะ ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรดเจือจาง เช่น กรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางได้ก๊าซไฮโดรเจน ปกติไม่พบในรูปอิสระ สามารถรวมตัวกับสารอินทรีย์ได้ดี (Hawley, 1977) ในธรรมชาติสามารถพบสังกะสีในรูปสินแร่หรือสารประกอบ เช่น Smith somite, sphallerite (ZnS), marmatite (Fe₂Zn₃) นอกจากนี้ยังพบปะปนใน cadmium sulfide (CdS) การสลายตัวของสังกะสี ทำให้ได้สังกะสีในรูป Zn²⁺ ซึ่งเคลื่อนย้ายได้ดีในสภาพกรด แต่เมื่ออยู่ในดินอ็อกไซด์ของสังกะสีถูกดูดซับโดยแร่และสารอินทรีย์ในดินตะกอน จึงพบการสะสมของสังกะสีได้ในผิวดินชั้นบน รูปของสังกะสีที่พบได้มากที่สุดในดิน คือ Zn²⁺ และสามารถพบสังกะสีได้ทั้งในพืช สัตว์และจุลินทรีย์ (McNeely *et al.*, 1979) โลหะสังกะสีและออกไซด์ของสังกะสีจะละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย ส่วนสังกะสีซัลเฟตและสังกะสีคลอไรด์ละลายน้ำได้ดี ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสังกะสีในขณะนั้น ความเข้มข้นของสังกะสีจะเพิ่มขึ้นถ้าความเป็นกรดของน้ำเพิ่มขึ้น

สังกะสีใช้ในการเคลือบโลหะ เพื่อป้องกันสนิมและการกัดกร่อน เช่นใน กระเบื้องสังกะสี หรือกระเบื้องสังกะสีลูกฟูก เรียกกันในวงการ ช่างโลหะว่า เหล็กอาบสังกะสี หรือ เหล็กชุบสังกะสีเป็นส่วนประกอบในโลหะผสม เช่นใช้ในการทำของเล่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์

สังกะสี เป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ แต่ต้องการในปริมาณที่น้อยมาก เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์หลายชนิด สังกะสีเป็นสารอาหารที่พบได้มากในหอยนางรม อาหารจำพวกโปรตีน ถั่วอัลมอนต์ เมล็ดฟักทอง และเมล็ดทานตะวัน ความเป็นพิษของสังกะสีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง สารอินทรีย์ และสารแขวนลอยในน้ำ เป็นต้น ตามปกติแหล่งน้ำผิวดินมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในน้ำทะเลมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (McNeely *et al.*, 1979)

4. แคดเมียม (Cadmium; Cd)

แคดเมียมเป็นธาตุในหมู่ IIB ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 112.4 เลขอะตอม 48 มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 320.9 และ 769 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 8.65 เป็นโลหะทรานซิชันสีขาว-ฟ้า เป็นธาตุมีพิษ ละลายได้ในกรดไนตริก และสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท มีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียว คือ 2+ (Hawley, 1977)

แคดเมียมมีโครงสร้างอะตอมและคุณสมบัติทางเคมีคล้ายสังกะสี ในธรรมชาติจึงมักพบอยู่ในแร่สังกะสี เป็นโลหะหนักที่พบน้อยในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ในรูปของ greenockite (CdS) ปกติพบในผิวโลกประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Alloway, 1990) แคดเมียมใช้ประโยชน์ในการทำแบตเตอรี่ แคดเมียม 3 ใน 4 ส่วน ใช้สำหรับผลิตถ่านไฟฟ้า โดยเฉพาะถ่านนิกเกิล-แคดเมียม และส่วนที่เหลือใช้สำหรับทำสีผง สารเคลือบและโลหะชุบ และเป็นสารทำให้พลาสติกมีความเสถียรอื่นๆ เช่น ใช้ในโลหะผสมบางชนิดที่มีจุดหลอมละลายต่ำ เนื่องจากแคดเมียมมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (coefficient of friction) ต่ำ และทนทานต่อความล้า จึงใช้ในโลหะผสมสำหรับการรองรับ (bearing alloys) แคดเมียมที่พบส่วนมากอยู่ในรูปของเกลือ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ เป็นเกลือพบได้มากที่สุด เป็นผงสีเหลือง ส่วนแคดเมียมซัลไฟด์ เป็นผงสีแดง มักเรียกว่า cadmium red ใช้ในสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ แคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมเทลลูไรด์ซึ่งสามารถใช้สำหรับการตรวจจับแสง หรือโซลาร์เซลล์ (Friberg *et al.*, 1974)

5. สารหนู (Arsenic; As)

สารหนู เป็นธาตุกึ่งโลหะอยู่ในหมู่ VA ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33 มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 817 และ 614 องศาเซลเซียส ลักษณะเป็นของแข็ง มีสามรูป คือ สารหนูสีเทา สารหนูสีดำ และสารหนูสีเหลือง เลขออกซิเดชันของสารหนู คือ -3, 0, +3, +5 สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะสามารถทำปฏิกิริยาได้กับทั้ง โลหะและอโลหะ ออกไซด์ของสารหนูเป็นทั้งกรดและเบส ทำปฏิกิริยาได้ดีกับคลอรีนและฟอสฟอรัสซึ่งเป็นอโลหะ และทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นจำนวนมากให้อาร์เซนไนด์ สารหนูไม่ละลายในกรดไฮโดรคลอริกถ้าไม่มีออกซิเจน และถึงแม้จะมีออกซิเจนอยู่ด้วยก็ละลายได้ช้า และไม่ละลายในกรดซัลฟิวริกเจือจาง แต่จะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น โดยให้ As_4O_6 กับทั้งยังทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกเจือจางโดยให้กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_3) และกับกรดไนตริกเข้มข้นโดยให้กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) สารหนูไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยตรงในการให้อาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (As_2O_5) แต่จะเตรียม As_2O_5 ได้จากการออกซิไดส์สารหนูด้วยกรดไนตริก As_2O_5 ละลายได้ดีในน้ำโดยให้สารละลายกรดอาร์เซนิก สารหนูรวมกับฮาโลเจนได้โดยตรงหรือปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์หรือซัลไฟด์กับฮาโลเจนได้อาร์เซนิกไทรเฮไลด์ สารหนูรวมกับกำมะถันให้ซัลไฟด์หลายชนิด เช่น As_2S_4 (สารหนูแดง) As_2S_3 (สารหนูเหลือง) และ As_2S_5 ซัลไฟด์เหล่านี้มีสมบัติเป็นกรดและละลายได้ในเบสแก่ (กฤษณา, 2520)

ในธรรมชาติมีสารหนูอยู่เป็นจำนวนน้อย เป็นธาตุที่มีพิษอย่างร้ายแรง อาจพบได้ในสายแร่เงิน ส่วนใหญ่อยู่ในสารประกอบเป็นแร่หลายชนิดกระจายอยู่ทั่วโลก แร่ที่มีสารหนูเป็นตัวประกอบ เช่น อาร์เซนไพไรต์ ($FeAsS$) ออร์พิเมนต์ (As_2S_3) รีอัลการ์ (As_4S_4) อาร์เซนไนด์ (As_2O_3) เลิลลิงไกต์ ($FeAs_2$) นิกโคไลต์ ($NiAs$) นอกจากนี้ สารหนูยังเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการที่ปฏิบัติกับสินแร่เงิน ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล และโคบอลต์ สารหนูใช้ในการทำทองบรอนซ์และทำดอกไม้ไฟ นอกจากนี้ ในการทำแบตเตอรี่สะสมไฟฟ้า ถ้าผสมสารหนูเล็กน้อยในตะกั่วและพลวงจะทำให้ได้โลหะผสมที่มีคุณภาพดีขึ้น (กฤษณา, 2520)

โลหะหนักถูกปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำโดยสาเหตุ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ โลหะหนักในแหล่งน้ำจะกระจายอยู่ในส่วนต่างๆ คือ ละลายอยู่ในน้ำ ถูกดูดซับโดยสิ่งของที่แขวนลอยหรือฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ ถูกดูดซับโดยวัตถุหรือตะกอนในแหล่งน้ำ และสะสมไว้ในตัวของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ (Wood, 1975; Enk and Mathis, 1977) โลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยตะกอนจะสามารถละลายอยู่ในน้ำได้โดยกระบวนการเคมี-ฟิสิกส์ และชีวเคมี

(Frenet, 1981) สาเหตุสำคัญที่ทำให้โลหะหนักแพร่ลงสู่แหล่งน้ำคือ กิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น วัสดุเหลือใช้และน้ำทิ้งจากชุมชน โดยเฉพาะการปะปนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และกิจกรรมด้านการเกษตร

การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ (สมลักษณ์, 2543) คือ

1. การปนเปื้อนจากแหล่งอุตสาหกรรม โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ โรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท มีการนำโลหะหนักมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต เช่น โรงงานกลั่นน้ำมัน ชุบโลหะ ผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ ผลิตถ่านไฟฉาย โรงงานทำสี ย้อมผ้า ฯลฯ ซึ่งโรงงานส่วนมากตั้งอยู่ใกล้แหล่งน้ำ ทำให้โลหะหนักเหล่านี้ถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำและถูกพัดพาเคลื่อนย้ายไหลผ่านแม่น้ำสายต่างๆ แล้วไหลออกสู่ทะเลต่อไป

2. การปนเปื้อนจากแหล่งเกษตรกรรม ประเทศไทยมีการใช้สารเคมีต่างๆเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรค่อนข้างสูง มีการนำสารกำจัดศัตรูพืช กำจัดเชื้อโรคต่างๆมาใช้ โดยสารเคมีหลายชนิดมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ มีผลทำให้โลหะหนักเกิดการสะสมตัวอยู่ในดิน สารพิษเหล่านี้จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำเมื่อเกิดการกัดเซาะหน้าดินโดยน้ำฝนในรูปตะกอน ปนเปื้อนลงสู่แม่น้ำและทะเลในที่สุด ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ

3. การปนเปื้อนจากแหล่งชุมชน เกิดจากขยะมูลฝอยที่มีชิ้นส่วนของวัสดุที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น กระดาษ ถ่านไฟฉาย กากหม้อแบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้น สารพิษที่เป็นโลหะหนักซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์จะมีการสะสมและถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สามารถที่จะตกค้างอยู่คงทนในสภาวะแวดล้อมได้เป็นเวลานาน สามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์สะสมในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจเป็นการเสี่ยงต่อการที่โลหะหนักจะสะสมในเนื้อเยื่อของมนุษย์ซึ่งเป็นผู้บริโภคชั้นสุดท้าย

สารพิษจากโลหะหนักชนิดต่างๆ สามารถ สะสมตัวอยู่กับตัวกลางในแหล่งน้ำ เช่น ดิน ตะกอน พืชน้ำ สาหร่าย สัตว์น้ำ หรือเขavn ลอยได้อย่างอิสระ ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในตัวกลางเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหาร การสะสมของโลหะหนักสามารถ จำแนกตามแหล่งที่พบได้ดังนี้

1. การสะสมของโลหะหนักในน้ำ

กิจกรรมที่เกิดขึ้นตามลำน้ำ นับตั้งแต่การทำเหมืองแร่ การสร้างเขื่อนบริเวณ ต้นน้ำ การท่องเที่ยว อุตสาหกรรมต่างๆ และบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ที่มีการ ใช้น้ำทำกิจกรรมต่างๆ พร้อมกับปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ โดยปกติสารอินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงลดภาวะมลพิษบางส่วนลงไปได้ มีสมรรถนะในการฟื้นตัวตามธรรมชาติ แต่มลพิษบางอย่างไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น สารพิษ หรือโลหะหนัก ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ (วีระวงศ์, 2543) ในแหล่งน้ำยังมีกระบวนการที่ทำให้ปริมาณของโลหะหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ กระบวนการดูดซับและตกตะกอนของดินตะกอนพื้นท้องน้ำ และการตกตะกอนของโลหะหนัก ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งสารประกอบโลหะหนักบางตัวจะไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก จึงเกิดการจมลงสู่พื้นท้องน้ำ ดังนั้น หากในน้ำมีปริมาณโลหะหนักอยู่สูง จะมีการตกตะกอนสะสมในแหล่งน้ำเกิดขึ้น ซึ่งหากมีความเข้มข้นมาก จะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม (พลยุทธ และวิวัฒน์, 2549)

ประเทศไทยกำหนดให้มีปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเล ดังนี้ โปรอมิค่าไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร สังกะสีไม่เกิน 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ตะกั่วไม่เกิน 8.5 ไมโครกรัมต่อลิตร ทองแดงไม่เกิน 8 ไมโครกรัมต่อลิตร แคดเมียมไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร และ สารหนูไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

ซึ่งจากการสำรวจตัวอย่างน้ำทะเลในพื้นที่ชายฝั่งทั่วประเทศ โดยกรมควบคุมมลพิษ (2549) ในบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยตอนใน ได้แก่ ปากแม่น้ำท่าจีน ปากแม่น้ำแม่กลอง ปากแม่น้ำเจ้าพระยา ปากแม่น้ำบางปะกง ปากคลอง 12 ชั้นวา หน้าโรงงานฟอกย้อม จังหวัดสมุทรปราการ บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยด้านตะวันออก ได้แก่ อ่าวชลบุรี อ่างศิลา บางแสน บางพระ จังหวัดชลบุรี ปากแม่น้ำจันทบุรี ปากแม่น้ำประแสร์ ปากแม่น้ำพังราด จังหวัดระยอง และท่าเทียบเรือแหลมฉบัง ปากแม่น้ำตราด-แหลมศอก ปากคลองใหญ่ จังหวัดตราด บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยภาคใต้ตอนบน

ได้แก่ ปากคลองบ้านบางตะบูน ปากคลองบ้านแหลมจังหวัดเพชรบุรี และสะพานปลาหัวหิน หาดสามพระยา อ่าวประจวบฯ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยภาคใต้ตอนล่าง ได้แก่ ปากแม่น้ำชุมพร จังหวัดชุมพร หาดสำโรง อำเภотаชนะ ปากคลองพุมเรียง ปากคลองท่าเคย ปากคลองกระแจะ ปากคลองคอนสัก ปากแม่น้ำตาปี อ่าวบ้านดอน และท่าเรือเฟอร์รี่ เกาะพะงัน จังหวัดสุราษฎร์ธานี ปากคลอง อำเภอก้าวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช และปากทะเลสาบสงขลา จังหวัดสงขลา บริเวณชายฝั่งทะเลด้านอันดามัน ได้แก่ หาดชาญคำริ ปากแม่น้ำระนอง จังหวัดระนอง บ้านน้ำเค็ม บ้านบางสัก จังหวัดพังงา หาดป่าตอง หาดกะตะน้อย จังหวัดภูเก็ต หาดคนพรัตน์ธารา แหลมตง (พีพีคอน) จังหวัดกระบี่ หาดปากเมง จังหวัดตรัง และท่าเทียบเรือปากบารา จังหวัดสตูล โดยเก็บตัวอย่างน้ำทะเลนำมาตรวจสอบ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่า บางสถานีในฤดูฝนมีปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลที่กำหนดไว้มากกว่าในฤดูแล้ง โดยในฤดูฝนมีปรอท สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง แมงกานีส และเหล็ก เกินค่าที่กำหนด ในขณะที่ในฤดูแล้งมีปริมาณตะกั่ว แมงกานีส และเหล็กที่เกินกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

การปนเปื้อนที่พบบริเวณอยู่ใกล้กับชุมชน อาจเนื่องมาจากการระบายน้ำเสียจากกิจกรรมในชุมชน เช่น อู่เคาะฟันสิรยนต์ ร้านเชื่อมกลึงโลหะ อู่ต่อ อและซ่อมเรือ และบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงแหล่งอุตสาหกรรม อาจมีสาเหตุการปนเปื้อนมาจากการระบายน้ำทิ้งลงสู่ชายฝั่งจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ ฟอกและย้อมสี โรงงานถลุงเหล็ก เป็นต้น บริเวณปากแม่น้ำที่อยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่เหล่านี้ จึงได้รับผลกระทบจากการชะล้างโลหะหนักต่างๆที่สะสมทั้งในผิวน้ำดิน มีการพัดพามวลสารต่างๆไหลลงสู่แม่น้ำ และยังมีกรรวมตัวกับอนุภาคโลหะหนักที่ปะปนในชั้นบรรยากาศโดยฝนไหลลงสู่แหล่งน้ำอีกทางหนึ่ง ทำให้มีปริมาณสูงมากในน้ำทะเลที่ตรวจพบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

ตารางที่ 1 ปริมาณโลหะหนักที่พบในตัวอย่างน้ำทะเลกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งและสถานีที่มีค่าเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง

ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำทะเล ชายฝั่ง	ปริมาณโลหะหนักที่พบ ในตัวอย่างน้ำทะเลทั้งหมด		สถานีที่ค่าเกินมาตรฐาน
		ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	
ปรอท (Hg) หน่วย:นาโนกรัมต่อลิตร	<100	<0.15–17.60	0.22–179.00**	**ปากคลองใหญ่ จ.ตราด
สังกะสี (Zn) หน่วย:ไมโครกรัมต่อลิตร	<50	<0.1–41.00	4.90–781.00**	**ปากคลองใหญ่ จ.ตราด
ตะกั่ว (Pb) หน่วย:ไมโครกรัมต่อลิตร	<8.5	<0.1–13.10*	0.23–21.30**	*มีค่าสูงสุดที่ ปากแม่น้ำตาปี อ่าวบ้านดอน จ.สุราษฎร์ธานี รองลงมา คือ บริเวณบ้านหนองแฟบ จ.ระยอง (10.90 ไมโครกรัมต่อลิตร) **มีค่าสูงสุดที่ปากคลองคอนสัก รองลงมา คือ ปากคลองใหญ่ จ.ตราด (14.89 ไมโครกรัมต่อลิตร) และหน้าโรงงานฟอกย้อม จ.สมุทรปราการ (9.45 ไมโครกรัมต่อลิตร)
ทองแดง (Cu) หน่วย:ไมโครกรัมต่อลิตร	<8	<0.1–4.69	<0.1–20.90**	**ปากแม่น้ำท่าจีน จ.สมุทรสาคร
โครเมียม (Cr) หน่วย:ไมโครกรัมต่อลิตร	<100	<0.1–2.61	<0.1–16.30	

ตารางที่ 1(ต่อ)

ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำทะเล ชายฝั่ง	ปริมาณโลหะหนักที่พบ ในตัวอย่างน้ำทะเลทั้งหมด		สถานที่ที่ค่าเกินมาตรฐาน
		ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	
แมงกานีส (Mn) หน่วย: ไมโครกรัมต่อลิตร	< 100	< 0.1 – 129.00*	1.98-4,036.0**	*มีค่าสูงสุดที่ ปากคลองบ้านบางสะพานน้อย จ.ประจวบฯ รองลงมา คือ บริเวณหาดสามพระยา อุทยานเขาสาร้อยยอด จ.ประจวบฯ (128.0 ไมโครกรัมต่อลิตร) **มีค่าสูงสุดที่อ่าวประจวบฯ จ.ประจวบฯ รองลงมา คือ แม่น้ำท่าจีนฝั่ง ตะวันตก จ.สมุทรสาคร(997 ไมโครกรัมต่อลิตร) และสถานีตรวจวิเคราะห์ บริเวณ จ. สมุทรปราการ ฉะเชิงเทรา สมุทรสาคร จันทบุรี ตรัง และ เพชรบุรี

ตารางที่ 1(ต่อ)

ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง	ปริมาณโลหะหนักที่พบ ในตัวอย่างน้ำทะเลทั้งหมด		สถานที่ที่ค่าเกินมาตรฐาน
		ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	
เหล็ก(Fe) หน่วย:ไมโครกรัมต่อลิตร	< 300	< 0.1 – 3,001.0*	3.3-8,380.0**	*มีค่าสูงสุดที่ หาดสำโรง จ.ท่าพระ จ.สุราษฎร์ธานี รองลงมาคือ ปากแม่น้ำ พังราด จ.ระยอง(2,046.0 ไมโครกรัมต่อลิตร)ปากคลองพุมเรียง ปากคลอง กระเดะ และปากคลองคอนสัก จ.สุราษฎร์ธานี บริเวณปากแม่น้ำบางปะกง จ. ฉะเชิงเทรา ปากคลอง 12 รัช นว จ.สมุทรปราการ สะพานปลาหัวหิน หาดสาม พระยาอุทยานสามร้อยยอด จ.ประจวบฯ ปากแม่น้ำปากพั้ง จ. นครศรีธรรมราชและหาดบ้านปากบารา จ.สตูล **มีค่าสูงสุดที่ปากคลองคอนสัก รองลงมาคือปากคลองใหญ่ จ.ตราด(6,618.0 ไมโครกรัมต่อลิตร) ทั้งนี้บริเวณอ่าวไทยตอนใน (จ.ฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงครามและ กรุงเทพมหานคร)บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยด้านตะวันออก (จ.จันทบุรี และ ตราด)บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยภาคใต้ตอนบน (จ.เพชรบุรี)บริเวณชายฝั่ง อ่าวไทยตอนล่าง (จ.สุราษฎร์ธานี) และบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน (จ.พังงา และสตูล) พบว่าทุกสถานี่ตรวจวิเคราะห์มีค่าเหล็กเกินมาตรฐาน

ตารางที่ 1(ต่อ)

ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำทะเล ชายฝั่ง	ปริมาณโลหะหนักที่พบ ในตัวอย่างน้ำทะเลทั้งหมด		สถานที่ค่าเกินมาตรฐาน
		ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	
แคดเมียม (Cd) หน่วย: ไมโครกรัมต่อลิตร	< 5	< 0.1 – 0.42	< 0.1 – 0.67	
สารหนู (As) หน่วย: ไมโครกรัมต่อลิตร	< 10	< 0.30-7.66	< 0.30-6.93	

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ(2549)

- * ปริมาณโลหะหนักที่พบเกินค่ามาตรฐานในฤดูแล้ง
- ** ปริมาณโลหะหนักที่พบเกินค่ามาตรฐานในฤดูฝน

2. การสะสมของโลหะหนักในดินตะกอน

ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเกิดจากการสะสมตัวตามธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การชะล้างพวกเกลือแร่ที่อยู่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือเป็นโลหะหนักในส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในบริเวณนั้น (จิระ, 2526) โดยทั่วไปความเข้มข้นของโลหะหนักในดินตะกอนจะ มีสูงกว่าที่มีอยู่ในน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และแร่ธาตุต่างๆ ระหว่างดินตะกอนกับน้ำ เช่น คาร์บอเนต และออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็ก จึงมีผลทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินตะกอนเปลี่ยนแปลงไป (วิกันดา, 2541)

โลหะหนักที่สะสมในดินตะกอน แยกออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Residual heavy metal จัดเป็นโลหะหนักที่มี crystal lattice ของ silicate matrix สะสมอยู่ในดินตะกอน จึงทำให้โลหะหนักที่มี crystal lattice มีการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะธรรมชาติ (Chester and Voutsinon, 1981)

2. Non- residual heavy metal เป็นโลหะหนักที่เกิดจากกระบวนการดูดซับ (absorption) ระหว่างอนุภาคของดินตะกอนกับอนุภาคของโลหะหนัก ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ในดินตะกอน (organometallic complex) โลหะหนักเหล่านี้สามารถเกิดการละลายออกมาในรูปสารประกอบที่ละลายอยู่ในน้ำได้ (Chester and Voutsinon, 1981)

จากการศึกษาโลหะหนักตกค้างในดิน ตะกอนจากแม่น้ำเจ้าพระยาในปี 2535 โดย จารุวรรณ และทองสา (2538) พบว่า โลหะหนักที่ตกค้างได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม อยู่ในช่วง 7.60-37.70 7.60-37.75 และ 0.24-1.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และจากการศึกษาของสุนันท์ และคณะ (2538) พบว่าสังกะสีที่ตรวจพบดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำแม่กลอง และชายฝั่งที่เป็นแหล่งเลี้ยงหอยหลอด จ.สมุทรสงคราม มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3. การสะสมของโลหะหนักในเนื้อเยื่อ

โลหะหนักที่อยู่ในน้ำมี 2 ลักษณะ คือ ละลายอยู่ในน้ำ และเกาะติดกับอนุภาคเล็กๆ ที่รวมอยู่กับสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้หลายทาง เช่น การกินอาหาร การ

หายใจ และทางผิวหนัง การสะสมของโลหะหนักในส่วนต่างๆของร่างกายจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแทรกซึมหรือการสะสมในเนื้อเยื่อแต่ละชนิดได้ต่างกัน จากการศึกษาของกองสิ่งแวดล้อมประมง (2537) ที่ได้ทำการสำรวจปริมาณสารพิษและโลหะหนักในแม่น้ำนครนายก พบว่าบริเวณที่ก่อสร้างเขื่อนบ้านท่าด่าน มีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสี ตะกั่ว เหล็ก แมงกานีส และแคดเมียม ปนเปื้อนในตัวอย่างปลาสร้อยขาวมากกว่าปลาชนิดอื่นๆ ซึ่งจากการศึกษาของแววตา และคณะ (2532) ที่เปรียบเทียบการสะสมโลหะหนักในสัตว์ทะเลจำพวก ปลา หมึก ปูม้า กุ้งตั๊กแตน หอยนางรม และกุ้ง บริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก พบว่า มีปริมาณการสะสม สังกะสีสูงที่สุดในสัตว์ทะเลทุกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2 และปริมาณปรอทและแคดเมียมที่พบไม่เกินค่าที่กำหนดให้มีได้ในสัตว์น้ำเพื่อการบริโภค แต่ในสังกะสีไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานที่ยอมรับในสัตว์น้ำไว้ (กองตรวจสอบและรับรองมาตรฐานสินค้าและผลิตภัณฑ์ สัตว์น้ำ, 2552) และแววตา และคณะ (2535) รายงานว่า ที่บริเวณตบจะมีการสะสมโลหะหนักส่วนใหญ่สูงที่สุด ส่วนอวัยวะสืบพันธุ์จะมีการสะสมสังกะสีสูงกว่าตบเล็กน้อย และที่บริเวณกล้ามเนื้อจะมีการสะสมโลหะหนักต่ำสุด

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนัก (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักเปียก) ที่พบในตัวอย่างสัตว์น้ำแต่ละชนิด

ชนิดของสัตว์น้ำ	ปริมาณโลหะหนักที่พบในตัวอย่างสัตว์น้ำ (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักเปียก)			**ค่าที่กำหนดให้มีได้ ในสัตว์น้ำ
	สังกะสี*	ปรอท	แคดเมียม	(ไมโครกรัมต่อกรัม)
ปลา	5.404	-	0.017	แคดเมียม <0.05 ปรอท <1.0
หมีก	12.938	0.025	-	แคดเมียม <1.0 ปรอท <0.5
ปูม้า	25.201	0.021	-	แคดเมียม <0.5 ปรอท <0.5
กิ้งคักเตน	22.531	0.016	-	แคดเมียม <0.5 ปรอท <0.5
หอยนางรม	160.221	0.017	-	แคดเมียม <1.0 ปรอท <0.5
กุ้ง	13.464	0.010	-	แคดเมียม <0.5 ปรอท <0.5

ที่มา: แววดา และคณะ (2532)

* ไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐานไว้

** กองตรวจสอบและรับรองมาตรฐานสินค้าและผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ (2552)

การสะสมของโลหะหนักในเนื้อเยื่อสาหร่าย เกิดจากโมเลกุลของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ จะทำปฏิกิริยาเคมีกับประจุไอออน ถูกสาหร่ายดูดซับไว้ผ่านชั้นผนังเซลล์ของสาหร่าย และสาหร่ายจะสะสมโลหะหนักเหล่านี้ไว้ในผนังเซลล์และเนื้อเยื่อชั้น intercellular matrix ในรูปของโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) (Lobban and Harrison, 1994) โลหะหนักที่สะสมในเซลล์ของสาหร่าย มีผลต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการเมแทบอลิซึมของสาหร่าย เช่น ปรอท และตะกั่ว เป็นธาตุที่สาหร่ายไม่ต้องการในการเจริญเติบโต และมีผลเป็นพิษต่อสาหร่าย เมื่อละลายอยู่ในน้ำในปริมาณความเข้มข้นเพียง 10-15 ไมโครกรัมต่อลิตร ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักในสาหร่าย ได้แก่ ตำแหน่งที่อยู่ของสาหร่าย ระยะเวลาที่สาหร่ายได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง อุณหภูมิ ฤดูกาล และมลพิษ

โดยรอบในแหล่งน้ำ Richardson (2009) ได้ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนัก ในสาหร่ายสี
แดง 3 ชนิด ได้แก่ *Acanthophora spicifera*, *Gracilaria salicornia* และ *Laurencia* sp. สาหร่ายสี
น้ำตาล *Dictyota bartayresiana*, *Padina* sp. และ *Sargassum polycystum* ในพื้นที่ชายฝั่งโดยรอบของ
Tanapag lagoon ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากแหล่งก่อสร้างและท่าเรือ ที่มีกิจกรรมที่มีการ
ปลดปล่อยโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำมาก พบว่า สาหร่ายมีการสะสมของสังกะสีสูงมาก รองลงมาได้แก่
ปรอท ตะกั่ว สารหนู และแคดเมียม

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย

ผลจากอุตสาหกรรมที่ขยายตัว เป็นที่มาของโลหะหนักต่างๆ ที่อาจปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม
โลหะหนักเหล่านี้สามารถสะสมและตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม ทั้งในน้ำ ดิน และอากาศ และถ่ายทอด
ตามลำดับของห่วงโซ่อาหารได้ การสะสมโลหะหนักในสาหร่าย เกิดจากโมเลกุลของโลหะหนักที่
ละลายอยู่ในน้ำทำปฏิกิริยาเคมีกับประจุไอออน โดยอาจเกิดการแพร่ผ่านหรือการดูดซับไว้และเข้าไป
แทนที่ประจุไอออนในชั้นผนังเซลล์ของสาหร่าย สาหร่ายจึงสะสมโลหะหนักไว้ในผนังเซลล์และไซโต
พลาสซึม บริเวณที่มีการสะสมจะมีความแตกต่างกันตามชนิดของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว และสตรอน
เซียมจะถูกดูดซับและเข้าไปรวมกับสารประกอบ โพลีแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์
สาหร่าย ส่วนโลหะหนักชนิดอื่น เช่น สังกะสี และ แคดเมียมจะเข้าไปรวมกับส่วนประกอบต่างๆ ใน
ไซโทพลาสซึม (Eide *et al.*, 1980) โดยปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายจะขึ้นกับปริมาณโลหะหนักใน
น้ำ จึงเป็นสาเหตุให้มีการนำสาหร่ายมาใช้ในการวัดปริมาณโลหะหนักที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำ (Daka,
2005) อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายขึ้นกับปัจจัยหลายประการ
ได้แก่ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำ การเจริญเติบโตของสาหร่าย อายุของสาหร่าย ความเค็ม
อุณหภูมิ และฤดูกาล เป็นต้น (Foster, 1976; Lobban and Harrison, 1994)

เนื่องจากสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับและสะสมโลหะหนัก ทำให้ตรวจพบปริมาณ
โลหะหนักในสาหร่ายมีปริมาณที่สูงกว่าในน้ำมาก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายกับ
ปริมาณโลหะหนักในน้ำ สามารถหาค่า concentration factor ซึ่งได้จากการคำนวณ (Lobban and
Harrison, 1994) ดังนี้

$$\text{concentration factor} = \frac{\text{ปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย (มิลลิกรัมของโลหะหนัก ต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย)}}{\text{ปริมาณโลหะหนักในน้ำ (มิลลิกรัมของโลหะหนัก ต่อมิลลิลิตร)}}$$

สาหร่ายสามารถดูดซับสังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล ได้มากกว่าปริมาณที่มีในน้ำ 10^3 – 10^4 เท่า (Ho, 1987) และดูดซับโครเมียม ได้มากกว่าถึง 10^6 เท่า (Lobban and Harrison, 1994) Foster (1976) ได้นำสาหร่ายสีน้ำตาล *Fucus vesiculosus* และ *Ascophyllum nodosum* มาใช้ดูดซับปริมาณโลหะหนักในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากแหล่งมลภาวะทางน้ำ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในสาหร่ายสูงกว่าปริมาณที่มีในน้ำมาก โดยสาหร่าย *F. vesiculosus* และ *A. nodosum* สามารถดูดซับสังกะสีได้สูงสุด รองลงมาได้แก่ แมงกานีส ทองแดง และ นิกเกิล ตามลำดับ ซึ่งในสาหร่าย *F. vesiculosus* มีค่าแมงกานีสและนิกเกิลสูงกว่าในสาหร่าย *A. nodosum* โดยเฉพาะแมงกานีสที่มีค่าสูงกว่าเกือบ 5 เท่า และในสาหร่าย *A. nodosum* มีปริมาณสังกะสีและทองแดงสูงกว่าใน *F. vesiculosus* เล็กน้อย

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำทะเลและในสาหร่าย และค่า concentration factors

โลหะหนัก	ความเข้มข้น ในน้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร)	<i>Fucus vesiculosus</i>		<i>Ascophyllum nosodum</i>	
		ความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Concentration factor ($\times 10^3$)	ความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Concentration factor ($\times 10^3$)
Zn	11.3	116	10	149	13
Cu	1.4	9	6.4	12	8.6
Mn	5.3	103	19	21	3.9
Ni	1.2	8	6.8	5.5	4.6

ที่มา: Foster (1976)

ซึ่งจากการคำนวณค่า concentration factor พบว่า สาหร่าย *F. vesiculosus* มีค่า concentration factor ในการดูดซับแมงกานีสได้สูงสุด เท่ากับ 19×10^3 เท่า และ *A. nodosum* สามารถดูดซับสังกะสี ได้มากกว่าปริมาณที่มีในน้ำ 13×10^3 เท่า ดังตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวม พบว่าสาหร่าย *F. vesiculosus* มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักดังกล่าวได้สูงกว่า *A. nodosum* ซึ่ง

ค่า concentration factor มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Leal *et al.* (1997) ที่ได้ศึกษาปริมาณ โลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง ปรอท และตะกั่ว จากบริเวณชายฝั่ง 3 แห่งของ Oporto coast (Matosinhos, Madalena, Cortegaca) ประเทศโปรตุเกส โดยนำสาหร่าย 2 สกุล คือ *Enteromorpha* spp. และ *Porphyra* spp. มาตรวจสอบปริมาณโลหะหนักที่มีในเนื้อสาหร่ายและในน้ำทะเล พบว่า สาหร่าย *Enteromorpha* spp. สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงกว่า *Porphyra* spp. อย่างเห็นได้ชัด และ โดยรวมก็สามารถดูดซับปริมาณโลหะหนักทั้งหมดได้สูงกว่าเช่นกัน แต่จะมีในพื้นที่ชายฝั่ง Matosinhos และ Madalena ที่สาหร่าย *Enteromorpha* spp. สามารถดูดซับปรอทได้น้อยกว่าในสาหร่าย *Porphyra* spp. โดยเมื่อคิดปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายเป็นไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง เปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักน้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร) พบว่า สาหร่ายทั้งสองชนิดมีปริมาณ โลหะหนักสูงกว่าในน้ำทะเลมาก และเมื่อคำนวณ ค่า concentration factor จึงพบว่า สาหร่ายทั้ง 2 ชนิด สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าปริมาณที่มีในน้ำ 10^2-10^3 เท่า โดยเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย ของ concentration factor พบว่า สาหร่าย *Enteromorpha* spp. สามารถดูดซับแคดเมียม ทองแดง และ ตะกั่วได้สูงกว่าในสาหร่าย *Porphyra* spp. โดยเฉพาะตะกั่วที่มีค่าสูงกว่ามาก ซึ่งสาหร่าย *Enteromorpha* spp. มีค่า concentration factor เฉลี่ยเท่ากับ 1.9×10^3 เท่า แต่ในสาหร่าย *Porphyra* spp. มีค่า 9.2×10^2 เท่า ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณเฉลี่ยของ Cd, Cu, Hg และ Pb ในน้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร) สำหรับ *Enteromorpha* spp. และ *Porphyra* spp. (ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) และค่า concentration factor ของ Cd, Cu, Hg และ Pb ในสาหร่าย *Enteromorpha* spp. และ *Porphyra* spp. จากบริเวณชายฝั่ง 3 แห่ง

สถานที่	ความเข้มข้น				ความเข้มข้น				concentration factor ($\times 10^2$)				ความเข้มข้น				concentration factor ($\times 10^2$)			
	น้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร)				<i>Enteromorpha</i> spp. (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)				<i>Enteromorpha</i> spp.				<i>Porphyra</i> spp. (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)				<i>Porphyra</i> spp.			
	Cd	Cu	Hg	Pb	Cd	Cu	Hg	Pb	Cd	Cu	Hg	Pb	Cd	Cu	Hg	Pb	Cd	Cu	Hg	Pb
Matosinhos	1.1	1.8	0.4	1.7	900	12000	160	4700	8.3	67	4.0	28	560	9000	240	2000	5.1	51	6.0	1.2
Madalena	1.1	2.0	0.32	2.4	880	13000	110	4100	8.0	64	3.4	17	730	11000	85	2000	6.6	54	2.7	8.3
Cortegaca	1.6	1.5	0.27	3.8	990	7200	94	4100	6.2	49	3.5	11	1100	7700	75	2800	6.7	52	2.8	7.3
ค่าเฉลี่ย	1.3	1.8	0.33	2.7	920	10700	120	4300	7.5	60	3.6	19	800	9200	130	2300	6.2	52	3.8	9.2

ที่มา: Leal *et al.* (1997)

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis*)

สาหร่ายสีเขียวในสกุล *Enteromorpha* ซึ่งปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนชื่อสกุลเป็น *Ulva* มีความทนทานในการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมในช่วงกว้าง สามารถเจริญได้ในน้ำที่มีความเค็ม 0-35 psu พบขึ้นได้ทั่วไปบริเวณแหล่งน้ำกร่อย ปากแม่น้ำ ตั้งแต่เขตน้ำขึ้นน้ำลงไปจนถึงเขตต่ำกว่าน้ำลงต่ำสุด สามารถทนต่อการฝังแห้งขณะน้ำลงได้ รวมทั้งสภาวะแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก สามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณมาก จึงถูกนิยมนำมาใช้ในการลดปริมาณโลหะหนักในแหล่งที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำ (Haritonidis and Malea, 1999; Conti and Cecchetti, 2003; Kamala-Kannan *et al.*, 2008) bikowski *et al.* (2006) ได้นำสาหร่าย *Enteromorpha* sp. มาศึกษาการดูดซับ โลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี และแมงกานีส และแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ได้แก่ โพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในพื้นที่ชายฝั่งทางตอนใต้ของทะเล Baltic บริเวณ Gulf of Gdansk และ Vistula Lagoon พบว่า สาหร่ายสามารถดูดซับโลหะหนัก โดยเฉพาะแมงกานีส และสังกะสีได้สูงมากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น และสามารถดูดซับแร่ธาตุโพแทสเซียม และโซเดียมได้ดีเช่นกัน ต่อมาได้มีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสาหร่าย 2 ชนิด ได้แก่ *Cladophora* sp. และ *Enteromorpha* sp. ในแหล่งรับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและบ้านเรือน พบว่าสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการช่วยลดปริมาณโลหะหนักและแร่ธาตุในน้ำได้ดี และในสาหร่ายพบความเข้มข้นของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในปริมาณที่สูงมาก (bikowski *et al.*, 2007) และมีการนำ *Ulva lactuca* มาใช้ดูดซับแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ใน Pulcat lake ที่ได้รับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่ทางตอนเหนือของ Chennai coastal ประเทศอินเดีย เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำ ดินตะกอน และสาหร่าย พบว่า มีการสะสมของโลหะในดินตะกอนมากกว่าปริมาณที่ พบในสาหร่าย โดยทั้งในดินตะกอนและสาหร่าย มีปริมาณโลหะหนักเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ ดังแสดงค่าในตารางที่ 5 เมื่อคำนวณค่า concentration factor ของการดูดซับโลหะหนัก พบว่า สาหร่ายสามารถดูดซับแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ได้มากกว่าปริมาณที่มีในน้ำได้ 6.68×10^4 4.41×10^3 และ 3.99×10^3 เท่า ตามลำดับ (Kamala-Kannan *et al.*, 2008)

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของโลหะหนักในสาหร่าย *Ulva lactuca* (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร) และในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)

	โลหะหนัก	จำนวนตัวอย่าง	พิสัย	ค่าเฉลี่ย	*concentration factor
<i>U. lactuca</i>	Cd	18	21.7-62.0	38.07±12.73	$5.43 \times 10^5 - 8.86 \times 10^5$
	Cr	18	10.5-45.7	24.68±9.22	$4.01 \times 10^3 - 7.5 \times 10^3$
	Pb	18	4.6-20.3	11.56±4.76	$1.92 \times 10^3 - 5.97 \times 10^3$
น้ำ	Cd	18	0.04-0.07	0.567±0.00	
	Cr	18	1.4-11.4	5.6±3.31	
	Pb	18	2.4-3.4	2.889±0.32	
ดินตะกอน	Cd	18	32.7-88.7	64.21±16.16	
	Cr	18	19.8-45.3	28.51±28.51	
	Pb	18	1.2-42.0	8.32±9.05	

ที่มา: Kamala-Kannan *et al.* (2008)

*concentration factor ได้จากการคำนวณปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย (มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่าย) ต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำ (มิลลิกรัมของโลหะหนักต่อมิลลิลิตร)

ในประเทศไทย ปีทมา และคณะ(2550) ได้ทำการศึกษาปริมาณ โลหะหนักที่พบในตัวอย่างสาหร่ายจากพื้นที่ จ.จันทบุรี และ จ. ประจวบคีรีขันธ์ พบว่า สาหร่ายสีเขียวแกมเขียวมีปริมาณโลหะหนักค่อนข้างสูง โดยสาหร่ายสีเขียวมีปริมาณปรอท ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และสารหนู มีค่าเท่ากับ 0.077-0.341, 2.6-10.2, 6.2-297.12, 6.6-16.87, 0.13-11.5 และ 0.237-5.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และสาหร่ายมีปริมาณโลหะหนักบางชนิดเกินปริมาณที่กำหนดโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา และหน่วยงานอื่น ได้แก่ ปรอท ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม และสารหนู ซึ่งแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายเป็นน้ำหนักแห้ง พบว่าอาจไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค หากคำนวณกลับเป็นน้ำหนักเปียกแล้ว ปริมาณที่

พบในสาหร่ายจะมีค่าลดลงน้อยกว่า 10 เท่า และไม่เกินค่าที่กำหนด ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พบในสาหร่ายนี้ เกิดจากการที่สาหร่ายสามารถดูดซับโลหะหนักในน้ำไว้ได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสาหร่ายไสล์ไก่อมาช่วยลดปริมาณโลหะหนักในน้ำของระบบการเลี้ยงกุ้ง

ตารางที่ 6 ปริมาณโลหะหนักที่พบในตัวอย่างสาหร่าย (หน่วย: มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)

ชนิดของโลหะหนัก	สาหร่ายจาก จ.จันทบุรี	สาหร่ายจาก จ.ประจวบคีรีขันธ์	ปริมาณที่กำหนดโดย อย.* และหน่วยงาน อื่น
ปรอท	0.091	0.077	< 0.5 (อาหารทะเล) < 0.02 (อาหารอื่น)
ตะกั่ว	2.6	10.2	< 1
สังกะสี	6.2	168.5	< 100
แคดเมียม	11.5	0.7	< 0.2 (ผักใบ) < 2 (หอยและหมึก)**
สารหนู	5.0	5.18	< 2

หมายเหตุ * ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 98) พ.ศ. 2529 เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน

** Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Foods (CODEX STAN 193-1995, Rev.3-2007)

ที่มา: ปัทมา และคณะ (2550)

ซึ่งจากการศึกษาการเลี้ยงสาหร่ายไสล์ไก่อร่วมกับการเลี้ยงกุ้งโดยชนิดดา และคณะ (2551) พบว่า เมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตได้สูงสุด อาจมีสาหร่ายถึง 142 กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง หรือประมาณ 1.5 ตันน้ำหนักเปียกต่อไร่ ดังนั้น สาหร่ายไสล์ไก่อจำนวนมากนี้ อาจสามารถช่วยลดปริมาณโลหะหนักในน้ำก่อนการเลี้ยงกุ้งที่บางพื้นที่อาจมีการสะสมของโลหะหนักในน้ำและในดิน ซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนัก ในบ่อก่อนการปล่อยกุ้งลงเลี้ยง และลดปัญหาการสะสมของโลหะหนักในตัวกุ้งที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายใส่ไถ่ในห้องปฏิบัติการ

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายใส่ไถ่ในห้องปฏิบัติการโดยมีวิธีการดังนี้

1.1 นำสาหร่ายใส่ไถ่ที่เก็บได้ มาพักในถังไฟเบอร์กลาสเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อบริการนำไปศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายใส่ไถ่ในการดูดซับแคดเมียมและสารหนูที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยเตรียมน้ำจากน้ำทะเลเทียมระดับความเค็มเดียวกับพื้นที่ที่นำตัวอย่างสาหร่ายมาที่ระดับความเค็ม 10 psu ใส่ลงในโหลทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ปริมาตรน้ำ 3 ลิตรต่อโหล เติมสารละลายแคดเมียมและสารหนูลงไปใต้น้ำทะเลเทียมในวันแรกที่เริ่มทำการศึกษา ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 0, 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายสารหนู 0, 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และชุดโหลทดลองที่ไม่มีสาหร่ายใส่ไถ่ ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมและสารหนุดังข้างต้น ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 0, 1, 2 และ 4 เท่า ของค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง ตามลำดับ และความเข้มข้นของสารละลายสารหนูที่ใช้เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 เท่า ของค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง ตามลำดับ โดยจะเติมเฉพาะในวันแรกที่เริ่มทำการศึกษา ที่ระดับความเข้มข้นละ 3 ชั่วโมง แผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design)

1.2 นำสาหร่ายจากถังพัก มาสะอาดน้ำออกและชั่งน้ำหนักสาหร่าย 150 กรัม ใส่ลงในโหลทดลองที่เตรียมไว้แล้ว ใช้หลอดไฟขนาด 60 วัตต์ ในการให้แสงโดยห่างจากโหลทดลอง 30 เซนติเมตร มีค่าความเข้มแสง 20-25 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ โดยใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาให้แสง 12 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. ให้อากาศโดยใช้วิธีการให้น้ำในโหลทดลอง ซึ่งปล่อยฟองอากาศ 60 ครั้งต่อนาที

1.3 นำตัวอย่างสาหร่ายและน้ำในโหลทดลองที่ครบกำหนดวันที่ 0, 2 และ 6 ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมและสารหนู มาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสารหนูด้วยวิธี ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) ที่บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง

(ประเทศไทย) จำกัด และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับ แคลเซียมและสารหนูของสาหร่ายไล้ไก่อ่และคำนวณค่า concentration factor ตามวิธีของ Lobban and Harrison (1994)

$$\text{concentration factor} = \frac{\text{ปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย (มิลลิกรัมของโลหะหนัก ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ของสาหร่าย)}}{\text{ปริมาณโลหะหนักในน้ำ (มิลลิกรัมของโลหะหนัก ต่อมิลลิลิตร)}}$$

ในกรณีที่ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีค่าต่ำมาก จนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จะใช้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้มาใช้ในการคำนวณหาค่า concentration factor

2. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำ สาหร่ายไล้ไก่อ่ และดินตะกอน ในบ่อที่มีสาหร่ายไล้ไก่อ่ และไม่มีสาหร่ายไล้ไก่อ่ในพื้นที่เดียวกัน

ศึกษาในบ่อพักน้ำในฟาร์มเลี้ยงกุ้งบริเวณพื้นที่ภาคใต้ตอนบน โดยใช้ น้ำความเค็มต่ำ ใช้ น้ำเค็มจากน้ำบาดาลซึ่งมีความเค็มประมาณ 50 psu ผสมกับน้ำจืดจนได้ความเค็มประมาณ 13-16 psu จำนวน 6 บ่อ บ่อละ 4 ไร่ แบ่งเป็นบ่อทดลองที่มีสาหร่ายไล้ไก่อ่ขึ้นอยู่ตามธรรมชาติ (ภาพที่ 2) จำนวน 3 บ่อ และบ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายไล้ไก่อ่ (ภาพที่ 3) จำนวน 3 บ่อ โดยมีวิธีการดังนี้

2.1 การเตรียมบ่อ

หลังจากจับกุ้งเสร็จแล้ว ที่กลางบ่อ ส่วนมากจะมีเลนมารวมกัน ดากบ่อระยะหนึ่ง แล้วเกลี่ยเลนกลางบ่อออกรอบๆ เพื่อให้เลนแห้งได้เร็วขึ้น

2.2 การเตรียมน้ำ

สูบน้ำจากคลองธรรมชาติผ่านตุ้กรองเข้าบ่อเลี้ยง โดยใช้ฝ้กรองขนาดช่องตา 130 ไมครอน การกรองจะช่วยในการลดปริมาณปลาและกุ้งจากธรรมชาติ รวมถึงไข่สัตว์น้ำ และ แพลงก์ตอน ตุ้กรองทำเป็นตุ้สามชั้น โดยชั้นในสุดเป็นมุ้งสี ฟ้ายาว 2 เมตร เพื่อกันขยะ (เศษไม้ หรือสิ่งไม่พึงประสงค์ชิ้นใหญ่) ชั้นสองเป็นฝ้กรองช่องตา 130 ไมครอน ขนาดใหญ่กว่าชั้นแรก

และชั้นนอกสุดเป็นมุ้งเขียว ซึ่งยึดติดกับถุงกรองละเอียด เพื่อเป็นตัวกรองพองถุงกรองไม่ให้ฝ้ากรองขาด เติมน้ำในบ่อให้ได้ระดับความลึก 70-80 เซนติเมตร สูบน้ำบาดาลเติมเข้าไปในบ่อให้ได้ความเค็มอยู่ระหว่าง 8-10 psu ระหว่างการเตรียมน้ำจะเปิดเครื่องให้อากาศตลอดเวลา 5-7 วัน หวานแร่ธาตุ 3-5 กิโลกรัมต่อไร่ และหวานจุลินทรีย์ ไร่ละ 1 กิโลกรัม

2.3 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำและปริมาณโลหะหนักในน้ำในบ่อทดลอง ที่มีสาหร่ายสีเขียวและบ่อควบคุม

โดยเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อทั้ง 6 บ่อ โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 15 วัน เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำต่าง ๆ ดังนี้

- ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ วัดโดยใช้เครื่อง YSI DO 200-4M
- อุณหภูมิ วัดโดยใช้ เครื่อง YSI DO 200-4M
- พีเอช วัดโดยใช้เครื่องวัดพีเอช รุ่น Ecoscan pH 5/6
- ความโปร่งแสงของน้ำ วัดโดยใช้ Secchi disc
- ความเค็ม วัดโดยใช้เครื่อง YSI 30/10 FT
- ค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) วัดโดยใช้เครื่อง YSI 30/10 FT
- ความเป็นด่างรวม (total alkalinity) วัดโดยใช้วิธี titration (APHA *et al.*, 1995)
- ความกระด้างรวม (total hardness) วัดโดยใช้วิธี EDTA titrimetric method (APHA *et al.*, 1995)
- แอมโมเนียรวม (total ammonia nitrogen: TAN) วัดโดยใช้วิธี phenol-hypochlorite method (APHA *et al.*, 1995)
- ไนไตรท์ (nitrite - nitrogen) วัดโดยใช้วิธี colorimetric method (APHA *et al.*, 1995)
- ไนเตรท (nitrate - nitrogen) วัดโดยใช้วิธี cadmium reduction (APHA *et al.*, 1995)

2.4 ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำ

โดยเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อดคลองที่มีสาหร่ายสีเขียวแกงทั้ง ก่อนและหลังเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกง และบ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียวแกง เก็บตัวอย่างน้ำทุก 15 วัน จนกระทั่งสาหร่ายเริ่มตาย โดยเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 1 ลิตร และเติมกรดไนตริกเข้มข้นชนิดที่มีความบริสุทธิ์สูง (analytical reagent grade) ปริมาณ 1-2 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่างน้ำ 1 ลิตร และเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยวิธี ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) ที่บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

2.5 ศึกษาปริมาณโลหะหนักในดิน ตะกอนของบ่อดคลองที่มีสาหร่ายสีเขียวแกงกับบ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียวแกง

โดยเก็บตัวอย่างดินตะกอนในบ่อดคลองที่มีสาหร่ายสีเขียวแกงกับบ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียวแกงก่อนและหลังนำสาหร่ายลงไปเลี้ยงในบ่อ เก็บตัวอย่างดินทุก 30 วันจนกระทั่งสาหร่ายเริ่มตาย โดยจะสุ่มเก็บตัวอย่างดิน 3 จุดต่อบ่อให้ได้ประมาณ 1 กิโลกรัม และเก็บรักษาตัวอย่างไว้ในที่เย็นไม่ให้อุณหภูมิร้อนและแสง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยวิธี ICP-MS ที่บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

2.6 ศึกษาปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายสีเขียวแกงในบ่อดคลองที่มีสาหร่ายสีเขียวแกง

โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายสีเขียวแกงในบ่อดคลองที่นำสาหร่ายมาเลี้ยงทุก 15 วัน จนกระทั่งสาหร่ายเริ่มตาย เก็บตัวอย่างสาหร่ายสีเขียวแกง 1 กิโลกรัม และเก็บรักษาตัวอย่างโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยวิธี ICP-MS ที่บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

ดิน หรือ ทรายที่ติดมากับสาหร่ายออกให้หมด ชับน้ำสาหร่ายให้หมาด ชั่งน้ำหนักเปียกของสาหร่าย โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง หน่วยเป็นกรัม นำสาหร่ายห่อใส่กระดาษหรือแผ่นอลูมิเนียม โดยเขียนหมายเลขกำกับสาหร่ายที่เก็บมาจากกรอบแต่ละกรอบ หลังจากนั้นนำสาหร่าย เข้าอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าสาหร่ายจะแห้งสนิท เมื่อทำการอบสาหร่ายจนแห้งแล้ว นำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกน้ำหนักแห้ง หน่วยเป็นกรัม (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง) จะได้น้ำหนักของสาหร่ายต่อพื้นที่ 0.25 ตารางเมตรของกรอบ ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 10 กรอบ นำมาคำนวณหามวลชีวภาพ (น้ำหนักแห้ง (กรัม)/พื้นที่ 1 ตารางเมตร) แล้วปรับข้อมูลผู้สำรวจจากคะแนนเป็นมวลชีวภาพ โดยหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของมวลชีวภาพของสาหร่ายและคะแนนจากกรอบ 10 กรอบ นำมาหาสมการเชิงเส้นเพื่อใช้เป็นสมการของผู้เก็บตัวอย่าง ทั้งนี้ เพื่อนำมวลชีวภาพของสาหร่ายใส่ไปในระยะเวลาดังกล่าวมาคำนวณปริมาณโลหะหนักรวมที่สาหร่ายสะสมไว้ ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของโลหะหนัก ในน้ำและในดินต่อไป

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

- ศึกษาในฟาร์มเลี้ยงกุ้ง บริเวณพื้นที่ภาคใต้ตอนบน ซึ่งเป็นฟาร์มเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมโดยใช้น้ำความเค็มต่ำ
- การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยธุรกิจเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ระยะเวลาทำการวิจัยตั้งแต่ เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2551 ถึง มีนาคม พ.ศ. 2552



ภาพที่ 2 บ่อทดลองที่มีสาหร่ายใ้ใ้



ภาพที่ 3 บ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายใ้ใ้

ผลและวิจารณ์

1. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายไส้ไก่ในห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม และสารหนูของสาหร่ายไส้ไก่ โดยนำสาหร่ายไส้ไก่ 150 กรัม มาดูดซับแคดเมียมและสารหนูที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ในโหลทดลองที่บรรจุน้ำทะเลเทียม ความเค็ม 10 psu เติมสารละลายแคดเมียมและสารหนูลงไปในวันแรก ที่เริ่มทำการศึกษา ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 0, 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายสารหนู 0, 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และชุดโหลทดลองที่ไม่มีสาหร่ายไส้ไก่

1.1 การดูดซับแคดเมียม

ผลการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณแคดเมียมในน้ำมีค่าน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร จนไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการตลอดระยะเวลาศึกษา และปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณที่พบในสาหร่ายไส้ไก่มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 และวันที่ 6 โดยมีค่าเท่ากับ 116.00 ± 8.00 และ 122.00 ± 19.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมในน้ำในวันที่ 2 ถึงวันที่ 6 ของระยะเวลาที่ทำการศึกษา มีค่าลดลงน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่า concentration factor พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 และ 6 โดยมีค่าเท่ากับ 116.00 ± 7.77 และ 122.00 ± 18.58 เท่า ตามลำดับ

ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณของแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 และวันที่ 6 มีค่าเท่ากับ 330.00 ± 15.00 และ 334.00 ± 53.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันปริมาณแคดเมียมในน้ำก็มีค่าลดลงจากวันแรก จนไม่สามารถวิเคราะห์หาได้ในวันที่ 2 และวันที่ 6 และเมื่อวิเคราะห์หาค่า concentration factor พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 เท่ากับ 330.00 ± 14.57 เท่า และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกในวันที่ 6 เท่ากับ 334.00 ± 53.00 เท่า

ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณของแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 และลดลงในวันที่ 6 มีค่า 446.00 ± 28.00 และ 419.00 ± 43.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนปริมาณแคดเมียมในน้ำมีค่าลดลงจากวันแรกจนไม่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นได้ในวันที่ 2 และวันที่ 6 เช่นเดียวกัน (ตารางที่ 8, ภาพที่ 4) โดยมีค่า concentration factor เพิ่มขึ้นในวันที่ 2 มีค่าเท่ากับ 446.00 ± 28.22 เท่า และมีค่าลดลงในวันที่ 6 โดยมีค่าเท่ากับ 419.00 ± 43.00 เท่า

ในโหลควบคุมชุดที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียว ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียม 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่า ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 4C)

เมื่อพิจารณาการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสีเขียวตลอดการ ศึกษาที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน พบว่า สาหร่ายสีเขียวในชุดทดลองที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับแคดเมียมที่ละลายในน้ำได้ดีในช่วงสองวันแรก หลังจากนั้นปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายมีค่าคงที่ (ภาพที่ 4A) โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำมีค่าลดลงในวันที่ 2 จนกระทั่งมีปริมาณเหลือน้อยจนไม่สามารถวิเคราะห์ต่อได้ในวันที่ 6 (ภาพที่ 4B) เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับแคดเมียมที่ละลายในน้ำได้จนหมดหรือเหลือ น้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ โดยสังเกตได้จากปริมาณแคดเมียมในน้ำของโหลชุดที่มีสาหร่ายสีเขียวที่มีความเข้มข้นลดลงอย่างชัดเจน แตกต่างจากโหลชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียวที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำคงที่ตลอดระยะเวลาศึกษา และปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวก็มีค่าเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 มีค่าสูงขึ้นในวันที่ 2 และ 6 โดยปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าสูงสุดในวันที่ 6 โดยมีค่าเท่ากับ 122.00 ± 19.00 และ 334.00 ± 53.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุดในวันที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 446.00 ± 28.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร เมื่อคำนวณค่า concentration factor ของสาหร่ายสีเขียวในการดูดซับแคดเมียม พบว่า ค่า concentration factor มีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 2 เท่ากับ 446.00 ± 28.22 เท่า ซึ่งต่างจากที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่มีค่า concentration factor สูงสุดในวันที่ 6 ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำหรือประสิทธิภาพการดูดซับของสาหร่าย

ไส้ไก่ที่ลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับที่สูงเกินไป จนทำให้ สาหร่ายเริ่มเน่า สลายเมื่อระยะเวลาผ่านไป (ตารางที่ 9, ภาพที่ 4D) อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ มีการเติม แคดเมียมเพียงครั้งเดียวในวันที่เริ่มการศึกษา ดังนั้น ปริมาณแคดเมียมจึงมีจำกัด ซึ่งคาดว่าใน ธรรมชาติ สาหร่ายไส้ไก่น่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้มากกว่านี้ เนื่องจากในธรรมชาติ บริเวณแหล่งอุตสาหกรรม โลหะหนักต่างๆ จะมีการสะสมทั้งในน้ำ ดิน และอากาศ เกิดการชะล้าง และถูกพัดพาลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้มีปริมาณโลหะหนักในน้ำตลอดเวลา (วิกัندا, 2541) ถึงแม้ว่าจะมี ปริมาณปนเปื้อนน้อยมาก แต่สาหร่ายจะดูดซับโลหะหนักได้จากสภาพแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง เมื่อ เปรียบเทียบกับที่ Leal *et al.* (1997) ได้ศึกษาปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง โปรอท และตะกั่ว จากบริเวณชายฝั่งประเทศโปรตุเกส โดยนำสาหร่าย 4 ชนิด คือ *Enteromorpha* spp. และ *Porphyra* spp. มาตรวจหาปริมาณโลหะหนักที่มีในสาหร่ายและในน้ำทะเล พบว่า สาหร่ายทั้ง 4 ชนิด สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าในน้ำถึง 10^2-10^3 เท่า โดย *Enteromorpha* spp. สามารถ ดูดซับแคดเมียมได้เฉลี่ย 920.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และมีค่าเฉลี่ย concentration factor ประมาณ 7.5×10^2 เท่า ซึ่งมีค่าสูงกว่าในการศึกษาครั้งนี้ ที่พบปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยใน สาหร่ายไส้ไก่สูงสุด 446.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และมี concentration factor สูงสุด เท่ากับ 446.00 เท่า และยังพบว่าในวันที่ 0 สาหร่ายไส้ไก่มิมีปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นต่ำกว่าปริมาณ แคดเมียมที่พบในธรรมชาติ ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่พบในสาหร่ายในธรรมชาติ มีค่าตั้งแต่ 270.00- 3,200.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงกว่าในน้ำทะเลประมาณ 10-100 เท่า (Muller *et al.*, 1993, Almela *et al.*, 2006) แต่หลังจากนำมาศึกษาการดูดซับแคดเมียมใน ห้องปฏิบัติการแล้ว พบว่า ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่และ ค่า concentration factor มีค่าอยู่ ในช่วงเดียวกับที่พบในธรรมชาติ เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง ที่กำหนดให้ ปริมาณแคดเมียมมีค่าไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) ในการศึกษานี้จึงได้ กำหนดให้มีค่าที่สูงเกินค่ามาตรฐาน 1, 2 และ 4 เท่า จึงทำให้ค่า concentration factor มีค่าใกล้เคียง กับค่าที่พบในธรรมชาติ ซึ่งใน บริเวณที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักจากแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆ จะพบว่ามีความเป็นไปได้ที่สาหร่ายไส้ไก่จะสามารถดูดซับปริมาณแคดเมียมที่สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ กำหนดไว้

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำ และใน *U. intestinalis*

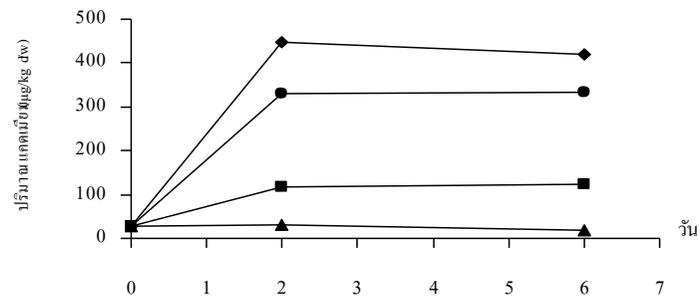
ความเข้มข้นของแคดเมียม						
วัน	0 µg/L			5 µg/L		
	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>
	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)
0	nd	nd	29.00±4.00	5.00±0.00	5.00±0.00	29.00±4.00
2	nd	nd	30.00±11.00	5.00±0.00	nd	116.00±8.00
6	nd	nd	20.00±0.00	5.00±0.00	nd	122.00±19.00

ความเข้มข้นของแคดเมียม						
วัน	10 µg/L			20 µg/L		
	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>
	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)
0	10.00±0.00	10.00±0.00	29.00±4.00	20.00±0.00	20.00±0.00	29.00±4.00
2	10.00±0.00	nd	330.00±15.00	20.00±0.00	nd	446.00±28.00
6	10.00±0.00	nd	334.00±53.00	20.00±0.00	nd	419.00±43.00

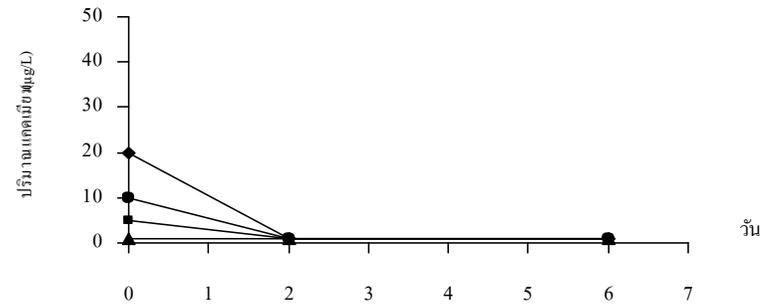
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ความแปรปรวน, nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<1 µg/L)

ตารางที่ 9 Concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของ *U. intestinalis*

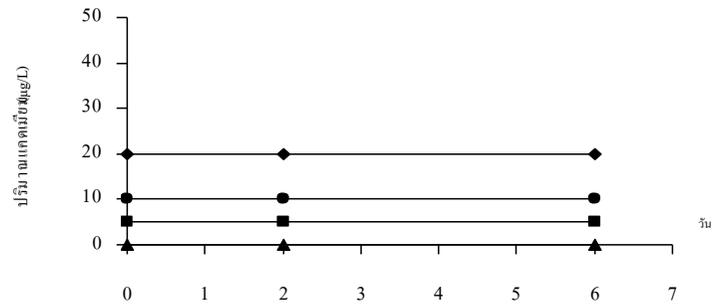
concentration factor				
ความเข้มข้นของแคดเมียม				
วัน	0 µg/L	5 µg/L	10 µg/L	20 µg/L
0	29.00±0.00	5.80±0.01	2.90±0.02	1.45±0.03
2	30.00±11.14	116.00±7.77	330.00±14.57	446.00±28.22
6	20.00±0.00	122.00±18.58	334.00±53.00	419.00±43.00



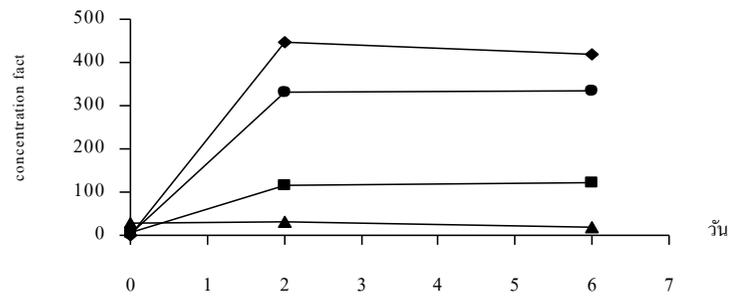
A



B



C



D

▲ 0 µg Cd/L ■ 5 µg Cd/L ● 10 µg Cd/L ◆ 20 µg Cd/L

ภาพที่ 4 ปริมาณแคดเมียม: (A) ใน *U. intestinalis*, (B) ในน้ำที่มี *U. intestinalis*, (C) ในน้ำที่ไม่มี *U. intestinalis*, (D) concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของ *U. intestinalis*

1.2 การดูดซับสารหนู

การดูดซับสารหนูของสาหร่ายสีเขียว ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 0 ไมโครกรัม ต่อลิตร ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียว ตลอดระยะเวลาศึกษามีค่าไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 602.00 ± 143.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ปริมาณสารหนูในน้ำไม่สามารถตรวจพบได้ โดยมีค่าน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 10 ไมโครกรัมต่อลิตร สาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับสารหนูที่ละลายน้ำได้ได้ในช่วง 2 วันแรก โดยมีค่าเท่ากับ 806.00 ± 115.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้น ปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายสีเขียวในวันที่ 6 มีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเท่ากับ 887.00 ± 187.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้นเล็กน้อย ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา

ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา โดยมีค่าเท่ากับ $1,434.00 \pm 498.00$ และ $1,634.00 \pm 202.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 2 และ 6 ตามลำดับ และปริมาณสารหนูในน้ำก็มีค่าลดลงในช่วง 2 วันแรก มีค่าเท่ากับ 21.00 ± 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 30.00 ± 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการศึกษา

ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร สาหร่ายสีเขียวมีความสามารถในการดูดซับสารหนูที่ละลายในน้ำได้สูงสุดในช่วง 2 วันแรก แต่หลังจากนั้น ปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายสีเขียวมีค่าลดลงจากเดิม โดยมีค่าเท่ากับ $2,256.00 \pm 31.00$ และ $1,870.00 \pm 180.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในวันที่ 2 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณสารหนูในน้ำก็มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 2 มีค่าเท่ากับ 32.00 ± 4.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกในวันที่ 6 เท่ากับ 47.00 ± 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร

โพลชุดควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียว ที่ความเข้มข้นของสารหนู 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อครบระยะเวลาในการทำการศึกษา ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำมีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน ปริมาณสารหนูในน้ำลดลงจากค่าความเข้มข้นเดิมในทุกชุดความเข้มข้น และหลังจากนั้นความเข้มข้นจะไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นที่ความเข้มข้นของ

สารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าลดลงอีก (ภาพที่ 5C) ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาการตกตะกอนของสารหนูในน้ำ สารหนูที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ อยู่ในรูปของกรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็น อาร์เซนทอไอออน (AsO_4^{3-}) ซึ่งจะไปรวมตัวกับเหล็กไอออน (Fe^{3+}) ในน้ำทะเลเทียมที่มีแร่ธาตุนี้อยู่ ทำให้ตกตะกอนลงสู่พื้น (Mambote *et al.*, 2002) นอกจากนี้ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) ก็มีผลต่อการตกตะกอนของสารหนู ที่ pH มากกว่า 8 จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น (De Vitre' *et al.*, 1991) โดยในการศึกษาค้างนี้ น้ำทะเลเทียมที่ใช้ทดลองมี pH ระหว่าง 8.2-8.4 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุร่วมที่ทำให้สารหนูตกตะกอน

การดูดซับสารหนูของสาหร่ายไส้ไก่ที่แต่ละระดับความเข้มข้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสารหนู 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา สาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับสารหนูที่ละลายในน้ำได้ดีในช่วงสองวันแรก หลังจากนั้นปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายมีค่าค่อนข้างคงที่ (ตารางที่ 10, ภาพที่ 5) มีเพียงที่ความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายลดลง (ภาพที่ 5A) โดยปริมาณสารหนูในสาหร่ายไส้ไก่มีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 2 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ $2,256.00 \pm 31.00$ ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง ซึ่งปริมาณสารหนูในน้ำในช่วงสองวันแรกในแต่ละความเข้มข้นก็มีความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าลดลงต่ำสุดในที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งลดลงจากค่าเริ่มต้นเดิมที่ 100.00 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็น 32.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และในวันที่ 6 เมื่อสาหร่ายไส้ไก่มีปริมาณสารหนูลดลง หรือไม่สามารถที่จะดูดซับสารหนูที่ละลายในน้ำได้อีก ปริมาณสารหนูในน้ำจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย จนสิ้นสุดระยะเวลาที่ทำการศึกษา (ภาพที่ 5B) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษานี้ ปริมาณสารหนูเริ่มต้นที่พบในสาหร่ายไส้ไก่ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 602.00 ± 143.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่พบได้ในธรรมชาติ โดยพบปริมาณสารหนูในสาหร่ายตามธรรมชาติ มีค่าตั้งแต่ 31-149,000 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง และปริมาณสารหนูที่พบในน้ำทะเลธรรมชาติ มีค่าประมาณ 0.3-7.66 ไมโครกรัมต่อลิตร (Caliceti *et al.*, 2002, Almela *et al.*, 2006) ซึ่งค่าที่พบในการศึกษานี้ยังมีค่าต่ำกว่าปริมาณที่พบในการศึกษาของ Caliceti *et al.* (2002) ที่ได้ศึกษาปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม และสารหนู ในสาหร่าย *Ulva rigida* และสาหร่ายชนิดอื่น ๆ รวม 7 ชนิด ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจากแหล่งอุตสาหกรรมและชุมชนในพื้นที่ Venice lagoon ประเทศอิตาลี พบว่า ในสาหร่าย *U. rigida* มีปริมาณของสารหนูเท่ากับ $7,000 \pm 3,000$ ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง และยังมีปริมาณของเหล็กและสังกะสีสูงมาก ($1,033 \pm 564$ และ 64 ± 55 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง) เช่นเดียวกับการศึกษาปริมาณ

โลหะหนักสะสมในสาหร่าย *U. rigida* ซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจที่ประชาชนนิยมบริโภค โดยสุ่มตัวอย่างจากร้านค้าเฉพาะที่จำหน่ายในเขตเมือง Vigo ประเทศสเปน นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometry พบว่า มีการสะสมของสารหนู 6,410-7,060 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

จากการที่ปริมาณสารหนูที่ตรวจพบมีค่าลดลงหลังจากวันที่ 2 ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษา มีค่าสูงเกินกว่าความสามารถในการดูดซับของสาหร่าย ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ระดับความเข้มข้นที่มากกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล 1 เท่า, 5 เท่า และ 10 เท่า โดยค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง กำหนดให้มีสารหนูได้ไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะพบในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก นอกจากนี้ยังอาจมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู เช่น แร่ธาตุ โดย จากการศึกษาของ Padmavathiamma and Li (2007) พบว่า ฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตมีผลต่อการดูดซับสารหนู เมื่อฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับสารหนู ในดินตะกอน สารหนูที่สะสมตัวในดินตะกอนจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ผิวหน้าดินกับไอออนในชั้นของน้ำ ทำให้ละลายน้ำได้มากขึ้น และทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูเข้าสู่เซลล์ แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ มีฟอสเฟตในปริมาณที่จำกัด จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สาหร่ายใส่ไก่อไม่สามารถดูดซับสารหนู ได้อีก ประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูจึงลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารหนูในสาหร่ายใส่ไก่อที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคำนวณ concentration factor แล้ว พบว่า มีค่าสูงตลอดระยะเวลาศึกษา เนื่องจากปริมาณสารหนูเริ่มต้นมีค่าสูง ในขณะที่ปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าต่ำและไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้พบมีค่าสูง

การสะสมตัวของสารหนูในสาหร่ายใส่ไก่อที่ความเข้มข้นของสารหนู 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่า ปริมาณสารหนูที่ตรวจพบในสาหร่ายใส่ไก่อเมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้น และมีอัตรา การสะสมตัวของสารหนูเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น มีค่าเท่ากับ 92.16 ± 17.86 , 720.82 ± 416.33 และ $1,542.49 \pm 87.58$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาผ่านไปครบ 6 วัน มีการสะสมตัวเพิ่มขึ้น แต่ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร การสะสมตัวลดลงต่ำกว่าระยะเวลา 2 วัน โดยที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 173.16 ± 159.41 , 920.82 ± 129.37 และ $1,156.82 \pm 900.78$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 11) อัตราการสะสมตัวของสารหนู แสดงถึงความสามารถในการสะสมตัวของสารหนูในเนื้อสาหร่าย ที่เปลี่ยนแปลงตาม

ระยะเวลา โดยเมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 วัน ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 10, 50 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร มีอัตราการสะสมสารหนู 46.08 ± 8.93 , 360.41 ± 208.17 และ 771.25 ± 43.79 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการสะสมสารหนูเมื่อระยะเวลาผ่านไป 6 วัน ที่มีค่าเท่ากับ 28.86 ± 26.57 , 153.47 ± 21.55 และ 192.80 ± 150.13 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อวัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการสะสมและอัตราการสะสมสารหนูของสาหร่ายสีเขียว หากนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการเลี้ยงกุ้ง ควรใช้ระยะเวลาสั้นๆ อาจจะประมาณ 1-2 สัปดาห์ในการนำสาหร่ายสีเขียวที่มีสภาพสมบูรณ์ลงไปเลี้ยงในบ่อ เพื่อให้สาหร่ายสามารถดูดซับสารหนูได้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะหากระยะเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง และสาหร่ายอาจเริ่มตายทำให้สารหนูที่สะสมในเซลล์สาหร่ายถูกปล่อยออกมาสู่น้ำได้ ทั้งนี้ในสภาพบ่อจริง ต้องมีการพิจารณาสภาพแวดล้อมในบ่อ มวลชีวภาพ และปัจจัยอื่น เช่น โลหะหนักในน้ำ ในดิน คุณภาพน้ำ ร่วมด้วย เพื่อให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้สูงสุด

ตารางที่ 10 ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำและใน *U. intestinalis*

ความเข้มข้นของสารหนู						
วัน	0 µg/L			10 µg/L		
	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>
	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)
0	nd	8.00±1.00	602.00±143.00	10.00±0.00	10.00±0.00	602.00±143.00
2	nd	9.00±1.00	777.98±42.00	10.00±0.00	12.00±2.00	805.51±115.00
6	nd	10.00±1.00	760.55±61.00	10.00±0.00	15.00±3.00	886.24±187.00

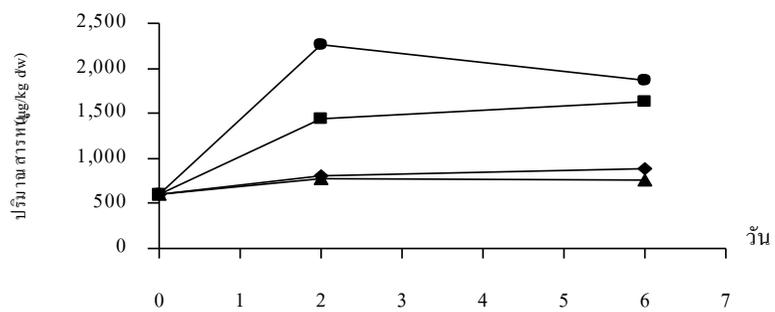
ความเข้มข้นของสารหนู						
วัน	50 µg/L			100 µg/L		
	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>	ในน้ำที่ไม่มี	ในน้ำที่มี	<i>U. intestinalis</i>
	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	<i>U. intestinalis</i> (µg/L)	(µg/kg dry weight)
0	50.00±0.00	50.00±0.00	602.00±143.00	100.00±0.00	100.00±0.00	602.00±143.00
2	30.00±10.00	21.00±2.00	1,433.95±498.00	48.00±12.00	32.00±4.00	2,255.94±31.00
6	27.00±12.00	30.00±1.00	1,633.95±202.00	16.00±6.00	47.00±1.00	1,870.64±810.00

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ความแปรปรวน, nd =ไม่สามารถตรวจพบได้ (<1 µg/L)

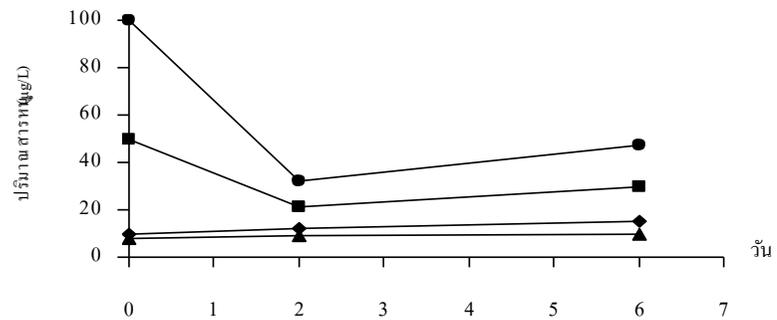
ตารางที่ 11 การสะสมของสารหนูและอัตราการสะสมของสารหนูใน *U. intestinalis* ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันเมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 วัน และ 6 วัน

การสะสมของสารหนูในสาหร่ายสีเขียว (µg/kg dry weight)				
ความเข้มข้นของสารหนู				
ระยะเวลา (วัน)	0 µg/L	10 µg/L	50 µg/L	100 µg/L
2	64.49±62.32	92.16±17.86	720.82±416.33	1,542.49±87.58
6	47.16±41.49	173.16±159.41	920.82±129.37	1,156.82±900.78

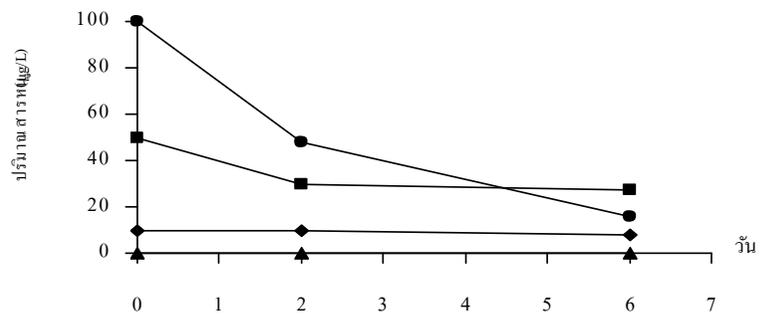
อัตราการสะสมสารหนูในสาหร่ายสีเขียว (µg/kg dry weight/day)				
ความเข้มข้นของสารหนู				
ระยะเวลา (วัน)	0 µg/L	10 µg/L	50 µg/L	100 µg/L
2	32.25±31.19	46.08±8.93	360.41±208.17	771.25±43.79
6	7.86±6.92	28.86±26.57	153.47±21.55	192.80±150.13



A



B



C

▲ 0 µg As/L ◆ 10 µg As/L ■ 50 µg As/L ● 100 µg As/L

ภาพที่ 5 ปริมาณสารหนู: (A) ใน *U. intestinalis* , (B) ในน้ำที่มี *U. intestinalis* และ (C) ในน้ำที่ไม่มี *U. intestinalis*

2. การศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายไส้ไก่ในระบบการเลี้ยงกุ้ง

การศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ในการดูดซับโลหะหนักในระบบการเลี้ยงกุ้งทะเล โดยทำการศึกษาในบ่อเลี้ยงขนาด 4 ไร่ ในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ แบ่งเป็นบ่อควบคุมที่ไม่มีสาหร่ายไส้ไก่จำนวน 3 บ่อ และบ่อทดลองที่มีสาหร่ายไส้ไก่จำนวน 3 บ่อ เก็บตัวอย่างสาหร่ายไส้ไก่ และน้ำทุก 15 วัน และคืนทุก 30 วัน เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณมวลชีวภาพ ปริมาณโลหะหนักในน้ำ สาหร่ายไส้ไก่และดิน ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

2.1 การศึกษามวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ภายในบ่อ

มวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลองที่ 1 ในวันที่ 0 มีค่าเริ่มต้น 4.73 ± 4.47 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร หลังจากนั้นสาหร่ายไส้ไก่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 14 และ 28 โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 16.73 ± 6.63 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตสูงสุดและหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงในวันที่ 42 และ 56 ตามลำดับ โดยเมื่อสิ้นสุดการศึกษา มีค่า 9.25 ± 3.85 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร หลังจากนั้นจึงนำสาหร่ายออกจากบ่อ เพื่อเตรียมปล่อยลูกกุ้งลงเลี้ยง

มวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลองที่ 2 ในวันที่ 0 มีค่าเริ่มต้น 7.90 ± 3.76 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในวันที่ 14 จนมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 17.68 ± 4.80 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และหลังจากนั้นสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว จนในวันที่ 42 มีปริมาณเหลือเท่ากับ 9.25 ± 2.63 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร หลังจากนั้นสาหร่ายไส้ไก่เริ่มตาย สืบเนื่องจากปริมาณสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อเริ่มลดลง จึงได้นำสาหร่ายออกจากบ่อ ก่อนการปล่อยลูกกุ้ง

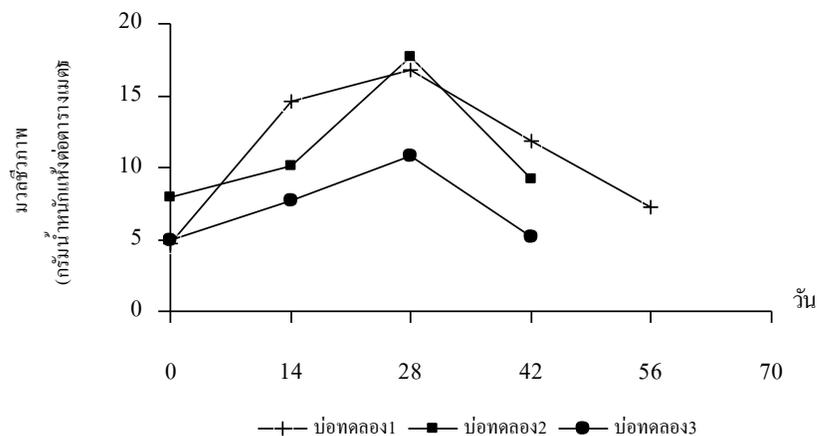
มวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลองที่ 3 ในวันที่ 0 มีค่าเริ่มต้น 4.96 ± 4.62 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และมีปริมาณสาหร่ายไส้ไก่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีปริมาณมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่สูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 10.82 ± 3.36 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และหลังจากนั้นสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อมีปริมาณลดลง จนมีค่ามวลชีวภาพเท่ากับ 5.22 ± 2.11 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ในวันที่ 42 หลังจากนั้นจึงได้นำสาหร่ายไส้ไก่ออกจากบ่อ ก่อนที่จะนำสลายหมดไปจากบ่อ

เมื่อพิจารณาผลมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อบำบัด พบว่า สาหร่ายสีเขียวในทุกบ่อบำบัดมีการเจริญเติบโตและมีค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพสูงสุดในวันที่ 28 โดยในบ่อบำบัดที่ 2 มีค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวที่สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 17.68 ± 4.80 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และบ่อบำบัดที่ 3 มีค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวที่ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 10.82 ± 3.36 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร หลังจากนั้นปริมาณสาหร่ายสีเขียวในทุกบ่อบำบัดจะมีค่าลดลงไปในทิศทางเดียวกัน โดยลดลงหลังจากวันที่ 28 และมีค่าลดลงเรื่อยๆจนสาหร่ายหมดไปจากบ่อ ซึ่ง ในบ่อบำบัดที่ 2 มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว (ตารางที่ 12; ภาพที่ 6) ค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพจากการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของชนิดดา (2551) ที่ได้ศึกษามวลชีวภาพและความหนาแน่นของสาหร่ายสีเขียวในบ่อที่เลี้ยงร่วมกับกิ้งกูดดำ จำนวน 3 บ่อ โดยเฉพาะเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวในบ่อก่อนการปล่อยลูกกิ้งกูดเลี้ยงเป็นเวลา 52 วัน พบว่า สาหร่ายสีเขียวทุกบ่อ มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นในวันที่ 21-42 และมีค่ามวลชีวภาพเฉลี่ยสูงสุดในวันที่ 42 โดยในบ่อที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 46.41 ± 15.41 , 10.58 ± 2.63 และ 15.35 ± 4.84 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ตามลำดับ และหลังจากปล่อยกิ้งกูดลงไป ในบ่อแล้ว มวลชีวภาพก็มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ในการศึกษานี้มีค่าสูงสุดในวันที่ 28 ซึ่งอาจเนื่องมาจากมีปริมาณแร่ธาตุและสารอาหารจำกัด เพราะมีการใส่แร่ธาตุและจุลินทรีย์ในช่วงที่มีการเตรียมน้ำเท่านั้น

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อบำบัด

วัน	มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว ($g\ dw/m^2$)		
	บ่อบำบัด 1	บ่อบำบัด 2	บ่อบำบัด 3
0	4.73 ± 4.47	7.90 ± 3.76	4.96 ± 4.62
14	14.57 ± 8.37	10.06 ± 8.02	7.67 ± 4.36
28	16.73 ± 6.63	17.68 ± 4.80	10.82 ± 3.36
42	11.89 ± 5.49	9.25 ± 2.63	5.22 ± 2.11
56	9.25 ± 3.85	-	-
70	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 6 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อทดลอง

2.2 การศึกษาปริมาณปรอทในดิน น้ำ และสาหร่ายสีเขียว

2.2.1 ปริมาณปรอทในดิน

จากการศึกษาปริมาณปรอทในดินพบว่า บ่อควบคุมที่ 1 ในวันแรกของการศึกษามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณปรอทในดินเฉลี่ยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีปริมาณลดลงมีค่า 36.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม แต่ยังคงพบว่ามีค่าสูงอยู่มาก (ภาพที่ 7A) ในบ่อควบคุมที่ 2 มีปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินในวันแรกของการศึกษามีค่าเท่ากับ 19.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นในวันที่ 28 ไม่สามารถตรวจพบได้ แต่ตรวจพบเล็กน้อยในช่วงก่อนสิ้นสุดการศึกษา โดยมีค่า 9.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 7B) ในบ่อควบคุมที่ 3 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินในวันแรกของการศึกษามีค่า 6.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณลดลงในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ย 0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับบ่อทดลองที่ 2 และในวันที่ 56 ตรวจพบมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 2.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 7C)

ปริมาณปรอทในดินของบ่อทดลอง พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการศึกษา โดยมีค่าเริ่มต้นในวันแรกของการศึกษาเท่ากับ 12.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องในวันที่ 28 มีปริมาณปรอทในดินเฉลี่ย

9.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จนมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 56 มีค่า 7.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 7D) ในบ่อทดลองที่ 2 มีปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 3.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณจะลดลงในวันที่ 28 จนมีค่าเท่ากับ 0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม แต่หลังจากนั้น กลับพบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 56 เท่ากับ 25.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 7E) ในบ่อทดลองที่ 3 ในวันแรกของการศึกษามีปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินเริ่มต้นเท่ากับ 20.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นจะมีปริมาณลดลงในวันที่ 28 และมีปริมาณลดลงไปจนสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษา โดยมีค่าปรอทเฉลี่ยในดิน 0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 7F) ดังแสดงค่าในตารางที่ 13

ปริมาณปรอทในดินของบ่อควบคุมมีแนวโน้มสูงกว่าในบ่อทดลองตลอดระยะเวลาการศึกษา โดยในบ่อควบคุมที่ 1 มีปริมาณปรอทในดินสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 86.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อมีค่าลดลงก็ยังมีค่าสูงอยู่มาก บ่อควบคุมที่ 2 และ 3 พบว่า หลังจากวันที่ 28 ไม่พบปรอทในดิน แต่กลับพบมีค่าขึ้นมาอีกเล็กน้อยในช่วงก่อนสิ้นสุดการศึกษา ในขณะที่ปริมาณปรอทในดินของบ่อทดลองที่ 1 มีค่าลดลงตั้งแต่เริ่มต้นไปจนสิ้นสุดการศึกษา บ่อทดลองที่ 2 ในช่วงแรกพบปริมาณปรอทในดินมีผลเช่นเดียวกับในบ่อควบคุมที่ 2 และ 3 คือ ไม่พบปรอทในดินหลังจากวันที่ 28 ขณะที่ในบ่อทดลองที่ 3 พบปรอทในดินเฉพาะในช่วงแรก และ หลังจากนั้นไม่พบปรอทในดินอีก

2.2.2 ปริมาณปรอทในน้ำ

จากการศึกษาปริมาณปรอทในน้ำของบ่อควบคุม พบว่า ในบ่อควบคุมที่ 1 มีปริมาณสูงที่สุดในวันแรกของการศึกษามีค่า 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และลดลงในวันที่ 14 และครั้งที่ในวันที่ 28, 42 และ 56 ของการศึกษา โดยมีค่าเฉลี่ยในน้ำน้อยกว่า 0.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ (ภาพที่ 7A) ในบ่อควบคุมที่ 2 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำ มีแนวโน้มคล้ายกับของบ่อควบคุมที่ 1 โดยมีปริมาณสูงสุดในวันแรกของการศึกษา มีค่าเฉลี่ย 2 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าลดลงน้อยกว่า 0.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 และไม่สามารถตรวจพบได้ไปจนสิ้นสุดการศึกษา (ภาพที่ 7B) ในบ่อควบคุมที่ 3 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำ มีค่าสูงสุดในวันแรก และวันที่ 14 ของการศึกษา โดยมีค่าเฉลี่ย 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะลดลงมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 0.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ใน

วันที่ 28 และวันที่ 42 ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นในวันที่ 56 โดยมีค่าเฉลี่ย 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 7C)

ปริมาณปรอทในน้ำในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าสูงสุดในวันแรกและวันที่ 14 ของการศึกษา โดยมีปริมาณเฉลี่ย 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีปริมาณลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 0.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ และคงที่ต่อไปในวันที่ 28, 42 และ 56 ของการศึกษา ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นในวันที่ 70 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 7D) ในบ่อทดลองที่ 2 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำในบ่อมีปริมาณสูงที่สุดในวันแรกของการศึกษามีค่า 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และลดลงในวันที่ 14 และมีปริมาณคงที่ในวันที่ 28, 42 และ 56 ของการศึกษา โดยมีค่าน้อยกว่า 0.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ (ภาพที่ 7E) ในบ่อทดลองที่ 3 วันแรกของการศึกษา มีปริมาณเฉลี่ยสูงสุดโดยมีค่า 2 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าลดลงในวันที่ 14 และคงที่ไปจนถึงวันที่ 28 โดยมีค่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีการลดลงน้อยกว่า 0.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่สามารถตรวจพบได้ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา (ภาพที่ 7F) ดังแสดงในตารางที่ 14

เมื่อพิจารณาปริมาณปรอทในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง พบว่า บ่อควบคุม หลังเริ่มทำการศึกษามีค่าลดลง จนไม่สามารถตรวจพบได้ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา และในบ่อทดลอง ปริมาณปรอทในน้ำของทุกบ่อก็มีค่าลดลงเช่นเดียวกับบ่อควบคุม จนไม่สามารถตรวจพบได้ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา ซึ่งปริมาณที่พบทั้งในบ่อควบคุมและบ่อทดลองมีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง คือมีค่าไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

ตารางที่ 13 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	6.00	19.00	6.00	12.00	3.00	20.00
14	-	-	-	-	-	-
28	6.00	0.00	0.00	9.00	0.00	0.00
42	-	-	-	-	-	-
56	36.00	9.00	2.00	7.00	25.00	0.00
70	-	-	-	-	-	-

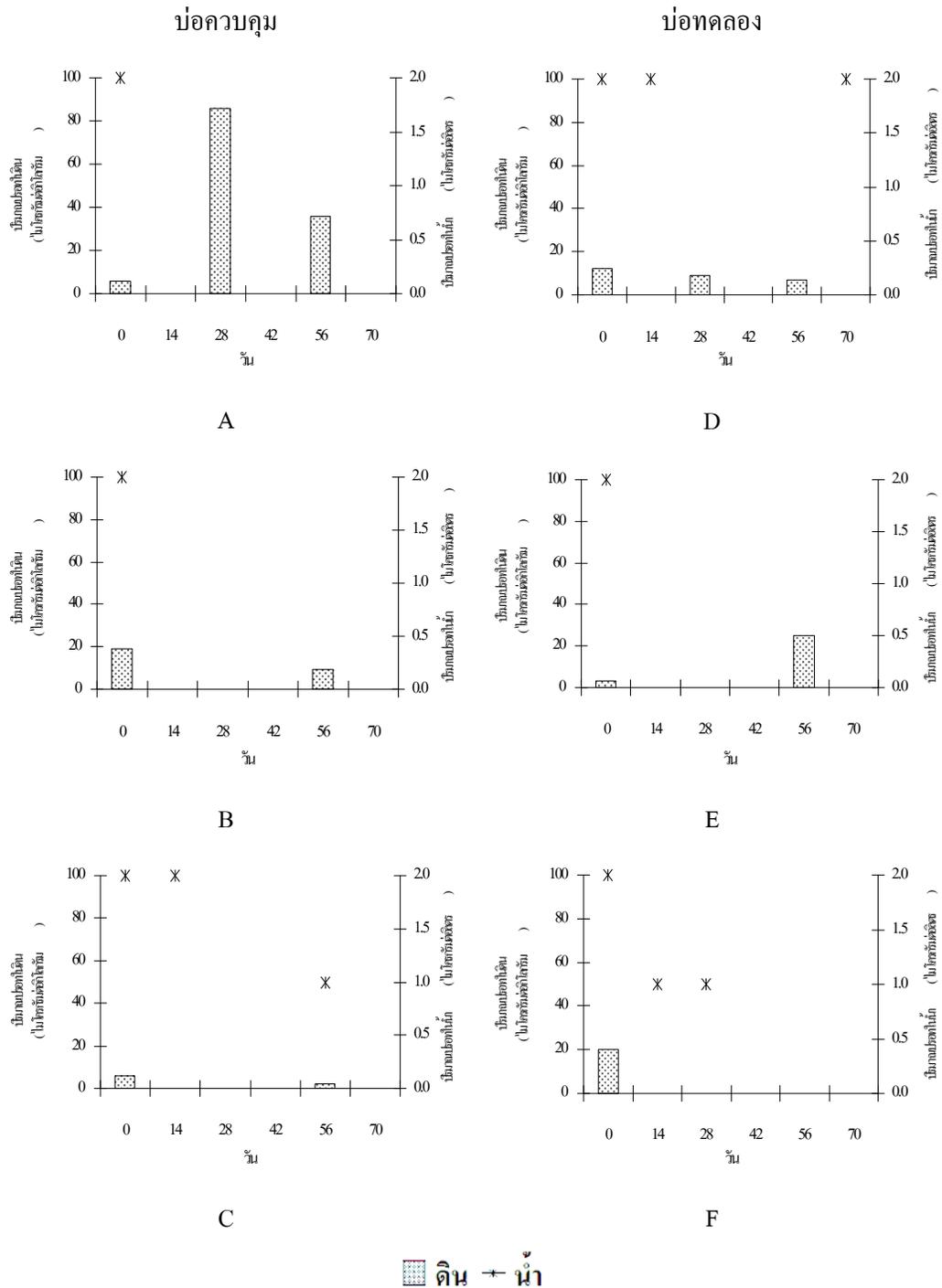
หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 14 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
14	nd	nd	2.00	2.00	nd	1.00
28	nd	nd	nd	nd	nd	1.00
42	nd	nd	nd	nd	nd	nd
56	nd	nd	1.00	nd	nd	nd
70	-	-	-	2.00	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<0.60)



ภาพที่ 7 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อลิตร) และปริมาณปรอทเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง

2.2.3 ปริมาณปรอทในสาหร่ายไส้ไก่

จากการศึกษาปริมาณปรอทในสาหร่ายไส้ไก่ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 ค่าเฉลี่ยที่ตรวจพบในวันแรกของการศึกษาเท่ากับ 20.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมีความลดลงในวันที่ 14 และคงที่ไปถึงวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 19.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีปริมาณลดลงต่ำสุดในวันที่ 42 มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 10.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการ แต่ในวันที่ 56 พบว่ามีค่า 20.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก เท่ากับวันแรกของการศึกษา (ภาพที่ 8A) ในบ่อทดลองที่ 2 ปริมาณปรอทที่ตรวจพบในสาหร่ายไส้ไก่ในวันแรกของการศึกษา พบว่า มีค่าเฉลี่ย 15.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 14 มีค่าเฉลี่ย 20.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นปริมาณปรอทลดลงในวันที่ 28 และ 42 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 10.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้จนถึงสิ้นสุดการศึกษา (ภาพที่ 8B) ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ในวันแรกของการศึกษา มีค่าเฉลี่ย 27.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมีความลดลงในวันที่ 14 โดยมีค่าเฉลี่ย 18.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 มีค่าเฉลี่ย 34.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก แต่ไม่สามารถตรวจพบได้ในวันที่ 42 ของการศึกษา มีค่าน้อยกว่า 10.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (ภาพที่ 8C) ซึ่งปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลองที่ 3 สูงกว่าในบ่อทดลองที่ 1 และบ่อทดลอง 2 ดังแสดงในตารางที่ 15

ปริมาณปรอทในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลองมีค่าสูงในวันที่ 14-28 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงอยู่ในระดับเดียวกัน จนไม่สามารถตรวจพบได้ บ่อทดลองที่ 1 มีค่าคงที่ในวันที่ 0-28 และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 42 แต่หลังจากนั้นพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นก่อนสิ้นสุดการศึกษา บ่อทดลองที่ 2 ปริมาณปรอทในสาหร่ายมีค่าสูงสุดในวันที่ 14 หลังจากนั้นค่าจะลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้เมื่อสิ้นสุดการศึกษา บ่อทดลองที่ 3 ในวันเริ่มต้นมีปริมาณปรอทสูงมาก โดยมีค่าเท่ากับ 27.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้น มีค่าลดลง แต่กลับมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 34 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าลดลงต่ำสุดอีกครั้งเมื่อสิ้นสุดการศึกษา

ตารางที่ 15 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อดทดลอง

วันที่	ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	20.00	15.00	27.00
14	19.00	20.00	18.00
28	19.00	nd	34.00
42	nd	nd	nd
56	20.00	-	-
70	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<10.00)

เมื่อนำข้อมูลปริมาณปรอทที่พบในสาหร่าย ไส้ไก่ คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และปริมาณปรอทในน้ำ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) มาคำนวณค่า concentration factor พบว่า ในบ่อดทดลองที่ 1 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 3.07 เท่า และลดลงเล็กน้อยในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 2.97 เท่า หลังจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 9.72 เท่า และมีค่าลดลงอีกในวันที่ 42 โดยมีค่าเท่ากับ 5.12 เท่า และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 56 เท่ากับ 10.23 เท่า ในบ่อดทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 2.30 เท่า และเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 เป็น 10.24 เท่า และลดลงในวันที่ 28 และคงที่จนถึงสิ้นสุดการศึกษา โดยมีค่าเท่ากับ 5.12 เท่า และค่า concentration factor ในบ่อดทดลองที่ 3 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง 28 วันแรก โดยวันแรกของการศึกษา ค่า concentration factor มีค่าเท่ากับ 4.15 เท่า และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 14 ของการศึกษา มีค่าเท่ากับ 5.53 เท่า หลังจากนั้น ในวันที่ 28 มีค่า concentration factor เพิ่มขึ้นสูงสุด มีค่าเท่ากับ 10.44 เท่า หลังจากนั้น มีค่าลดลงเป็น 5.12 เท่า ในวันที่ 42 (ตารางที่ 16; ภาพที่ 8D) เมื่อพิจารณาค่า concentration factor ในบ่อดทดลอง พบว่า บ่อดทดลองที่ 1 และ 3 มีค่า concentration factor ไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 28 และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าสาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับปรอทได้มากกว่าปริมาณปรอทในน้ำ บ่อดทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor สูงสุด

ในวันที่ 14 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง แต่กลับพบมีค่าสูงขึ้นอีกเมื่อสิ้นสุดการศึกษา สาหร่ายสีเขียวแกมมา
ค่า concentration factor สูงสุดในบ่อทดลองที่ 3 ในวันที่ 28 โดยสาหร่ายสีเขียวแกมมาสามารถดูดซับปรอท
ได้มากกว่าปรอทที่มีในน้ำได้สูงสุด 10.44 เท่า

เมื่อพิจารณามวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาพร้อมกับปริมาณปรอทในดินและในน้ำ พบว่า ใน
บ่อทดลองที่ 1 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 16.73 ± 6.63 กรัม
น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโต และมีมวลชีวภาพสูงสุดนี้ พบว่า
ปรอทในดินก็มีค่าลดลง เช่นเดียวกับปริมาณปรอทในน้ำที่คงที่ในช่วง 14 วันแรก ก่อนที่จะมีค่า
ลดลงในวันที่ 28 และคงที่ไปจนถึงวันที่ 56 ในขณะที่ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อมีค่าคงที่
ซึ่งส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับปรอทของสาหร่ายมีค่าสูงตามไปด้วย โดยมีค่า
เท่ากับ 9.72 เท่า หลังจากนั้นเมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาลดลง ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวแกมมา
ก็มีค่าลดลงไปด้วย ค่า concentration factor จึงมีค่าลดลง หลังจากนั้นกลับพบว่า concentration
factor มีค่าสูงขึ้นอีกในวันที่ 56 ในขณะที่มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาลดลงเล็กน้อย แต่
ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวแกมมามีค่าสูง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าสาหร่ายสีเขียวแกมมาอาจมีการสะสมปรอทสูงสุด
ในช่วงนี้ จึงมีค่า concentration factor สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 10.23 เท่า แต่หลังจากวันที่ 70 ของ
การศึกษา ปริมาณปรอทในน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อ

ในบ่อทดลองที่ 2 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ
 17.68 ± 4.80 กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งในช่วงที่สาหร่ายสีเขียวแกมมามีมวลชีวภาพสูงสุด กลับพบว่า
ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อมีค่าลดลงต่ำสุด และ ปรอทในดินก็มีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0
ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณปรอทในน้ำก็มีค่าน้อยจนไม่สามารถตรวจพบได้ ตั้งแต่วันที่ 14
ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา จึงส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับปรอทของสาหร่ายมีค่า
ลดลงตามไปด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 5.12 เท่า แต่ในช่วงวันที่ 14 ที่มีค่ามวลชีวภาพเฉลี่ย 10.06 ± 8.02
กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร พบว่า มีค่า concentration factor สูงสุด เท่ากับ 10.23 เท่า และในช่วง
นี้ก็มีค่าปรอทในสาหร่ายสีเขียวแกมมาสูงสุด หลังจากนั้นในวันที่ 42 เมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมา
ลดลง ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวแกมมาก็พบว่ามีค่าลดลงด้วย ค่า concentration factor จึงมีค่าลดลง
เช่นเดียวกับวันที่ 28

ในบ่อทดลองที่ 3 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ
 10.82 ± 3.36 กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งพบว่า ในวันที่ 28 ปรอทในดินก็มีค่าลดลงจนมีค่า

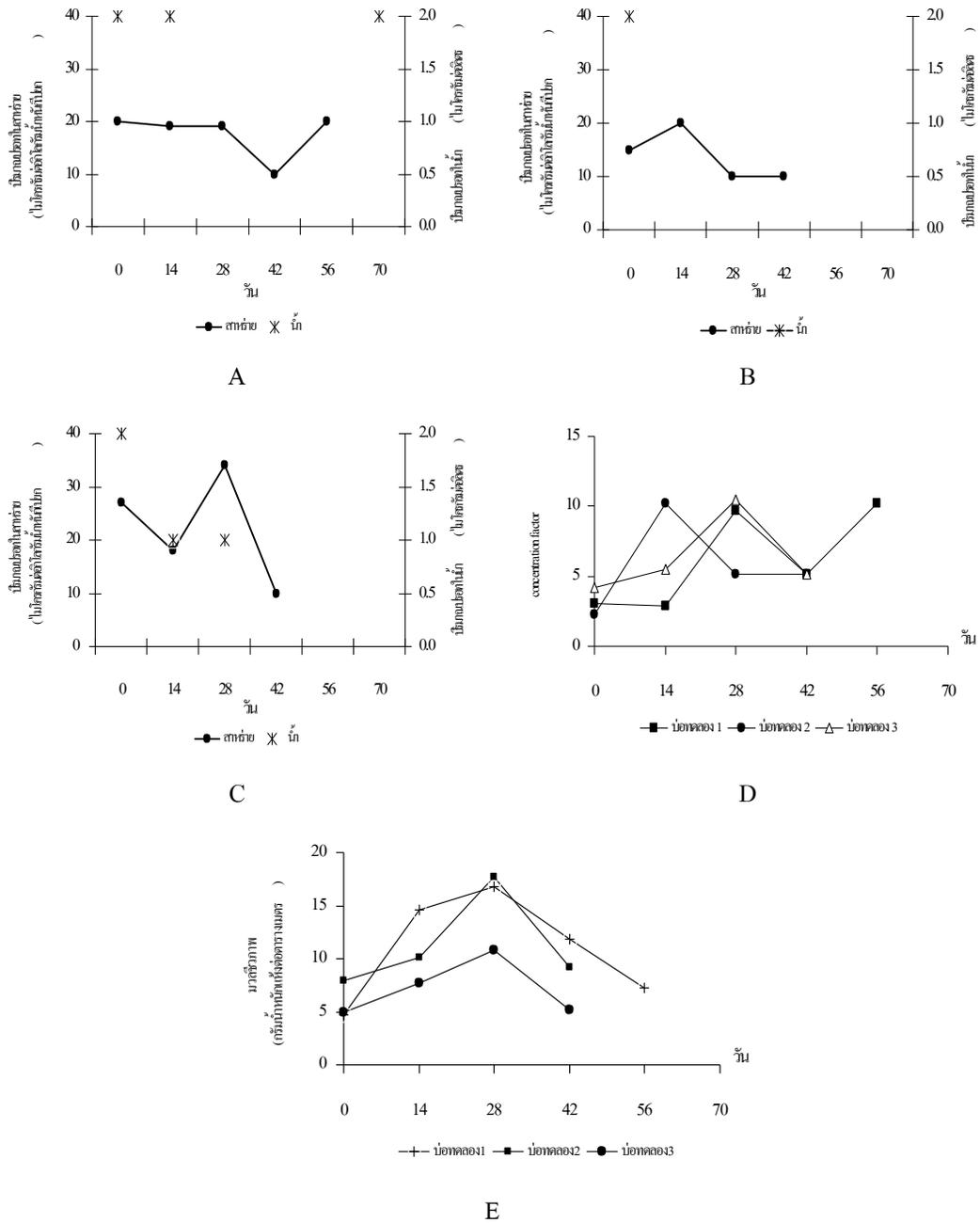
เท่ากับ 0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา เช่นเดียวกับปริมาณปรอทในน้ำที่คงที่ในช่วง 14-28 วัน และหลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้ ในขณะที่ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวในบ่อมีค่าสูงสุด เท่ากับ 10.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง จึงส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับปรอทของสาหร่ายมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 10.44 เท่า หลังจากนั้นเมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวลดลง ปริมาณ ปรอทในสาหร่ายสีเขียวก็มีค่าลดลงด้วย ค่า concentration factor จึงมีค่าลดลง เช่นเดียวกับช่วง 14 วันแรกของการศึกษาที่ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวมีค่าต่ำ ค่า concentration factor ก็มีค่าต่ำด้วย

จึงอาจกล่าวได้ว่า ค่า concentration factor หรือความสามารถในการดูดซับปรอท มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวรวมทั้งมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวที่พบในบ่อ ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวของบ่อทดลองมีค่าสูงในวันที่ 14-28 หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงอยู่ในระดับเดียวกัน จนไม่สามารถตรวจพบได้ ในบ่อทดลองที่ 1 ปริมาณปรอทที่พบในสาหร่ายสีเขียว มีค่าต่ำมากที่สุดที่ไม่สามารถตรวจพบได้ ($nd < 3.07$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ถึง 6.14 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 2 ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียวมีค่าอยู่ที่ $nd-6.14$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียว มีค่าเท่ากับ $nd-10.44$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งปริมาณปรอทจากการศึกษานี้ มีค่าต่ำกว่าจากการศึกษาของ Richardson (2009) ที่ได้ศึกษาผลกระทบจากปริมาณโลหะหนักในเขตเมืองและอุตสาหกรรมที่ไหลลงสู่ Tanapag lagoon ประเทศเปอร์โตริโก โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายบริเวณเขตน้ำขึ้นลง ได้แก่ *Acanthophora spicifera*, *Dictyota bartayresiana*, *Gracilaria salicornia*, *Laurencia* sp., *Padina* sp. และ *Sargassum polycystum* นำมาวิเคราะห์ พบว่า มีการสะสมของปรอทในตัวอย่างสาหร่ายทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 450.00-10,200.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในสาหร่าย *Ulva rigida* ที่เก็บเกี่ยวจากแหล่งในมหาสมุทรแอตแลนติกและแปซิฟิก ในเขตน่านน้ำของประเทศสเปน พบว่า มีค่า 49.00 ± 16.00 และ $37,000.00 \pm 40.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Besada *et al.*, 2009) และจากการศึกษาของ Leal *et al.* (1997) พบว่า ในสาหร่าย *Enteromorpha* spp. ที่เจริญบริเวณ Oporto coast ประเทศโปรตุเกส มีปรอทอยู่ในช่วง 110.00-160.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่าปริมาณที่พบในบ่อทดลอง และมีค่าต่ำกว่าจากการศึกษาของปัทมา และ คณะ (2550) ที่พบว่ามีค่าปรอทในสาหร่ายสีเขียวในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์และจันทบุรี โดยมีค่า 91.00 และ 77.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ

ตารางที่ 16 ปริมาณปรอทในสาหร่ายสีเขียว ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับปรอทของบ่อดลอง

วันที่	บ่อดลอง								
	บ่อ 1			บ่อ 2			บ่อ 3		
	สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor
0	6.14	2.00	3.07	4.61	2.00	2.30	8.29	2.00	4.15
14	5.83	2.00	2.92	6.14	0.60	10.23	5.53	1.00	5.53
28	5.83	0.60	9.72	3.07	0.60	5.12	10.44	1.00	10.44
42	3.07	0.60	5.12	3.07	0.60	5.12	3.07	0.60	5.12
56	6.14	0.60	10.23	-	0.60	-	-	0.60	-
70	-	2.00	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 8 ปริมาณโปรตีนคลอโรฟิลล์ในสาหร่ายใต้น้ำ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และปริมาณโปรตีนคลอโรฟิลล์ในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับโปรตีนของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายใต้น้ำในบ่อทดลอง

A

จากการศึกษาครั้งนี้ ที่ระดับความเข้มข้นของปรอทต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ปลอดภัย ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง พบว่า ในช่วงที่มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของปรอทในสาหร่ายมีค่าเท่ากับ 5.01 ± 1.69 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่า 8.36 ± 2.81 เท่า และที่ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสูงกว่า 1-5 เท่าของค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของปรอทในสาหร่ายมีค่าเท่ากับที่ระดับความเข้มข้นของปรอทต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับค่า concentration factor ก็มีค่าเท่ากับที่ระดับความเข้มข้นของปรอทต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร เมื่อระดับความเข้มข้นของปรอทในน้ำมีค่าสูงขึ้นมากกว่า 5-25 เท่า ของระดับมาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง ความเข้มข้นของปรอทในสาหร่ายสีเขียว มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของปรอทในน้ำที่สูงขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.85 ± 2.37 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่าลดลงเท่ากับ 5.94 ± 3.31 เท่า ซึ่งแม้ว่าความเข้มข้นของปรอทจะมีค่าสูงขึ้น แต่ระดับความเข้มข้นของปรอทในน้ำก็เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมเป็น 5-25 เท่า ค่า concentration factor จึงลดลง ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณปรอทเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวและค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ

บ่อดทดลอง		
ระดับความเข้มข้นของปรอท ในน้ำ ($\mu\text{g/L}$)	ความเข้มข้นของปรอท ในสาหร่าย ($\mu\text{g/kg dry weight}$)	concentration factor
0.10 (ค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง)	5.01 ± 1.69 (n=3)	8.36 ± 2.81 (n=3)
>0.10-0.50 (1-5 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	5.01 ± 1.69 (n=3)	8.36 ± 2.81 (n=3)
>0.50-2.50 (5-25 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	5.85 ± 2.37 (n=9)	5.94 ± 3.31 (n=9)

เมื่อพิจารณาช่วงที่สาหร่ายสีเขียวมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นใน 28 วันแรก และคำนวณปริมาณโปรทที่สาหร่ายสีเขียวดูดซับได้ในบ่อพื้นที่ทั้งหมด 4 ไร่ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 สาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับโปรทได้เท่ากับ 184.66-620.98 ไมโครกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 สาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับโปรทได้เท่ากับ 232.49-393.66 ไมโครกรัม และในบ่อทดลองที่ 3 สาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับโปรทได้เท่ากับ 263.26-720.45 ไมโครกรัม ดังแสดงค่าในตารางผนวกที่ 2

2.3 การศึกษาปริมาณตะกั่วในดิน น้ำ และสาหร่ายสีเขียว

2.3.1 ปริมาณตะกั่วในดิน

ปริมาณตะกั่วในดินของบ่อควบคุมที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 15,010 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีการลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12,273 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 15,346 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อควบคุมที่ 2 ในวันแรกของการศึกษามีค่าเท่ากับ 12,206 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีการลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 8,752 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อควบคุมที่ 3 เริ่มต้นมีค่าสูงมากเท่ากับ 24,876 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในวันที่ 28 และ 56 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12,278 และ 5,513 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ปริมาณตะกั่วในดินของบ่อทดลอง พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ปริมาณตะกั่วในดินของบ่อทดลองทุกบ่อมีค่าลดลงจากความเข้มข้นเดิมถึงในวันที่ 28 แต่หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในบ่อทดลองที่ 1 ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยเริ่มต้นวันแรกเท่ากับ 22,518 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,930 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 27,918 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 มีปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในวันแรกเท่ากับ 15,806 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าลดลงเล็กน้อยในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 14,575 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม แต่หลังจากนั้นกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น สูงสุดในวันที่ 56 มีค่าเท่ากับ 36,957 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อทดลองที่ 3 ในวันแรกของการศึกษามีปริมาณตะกั่วในดินเริ่มต้นเท่ากับ 19,162 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีการลดลง มีค่าเท่ากับ 13,300 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในวันที่ 28 และเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษา โดยมีค่าเท่ากับ 13,265 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงค่าในตารางที่ 18

ตลอดระยะเวลาการศึกษา พบว่า ปริมาณตะกั่ว ในดินของบ่อควบคุมที่ 1 และ 2 มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าลดลงในวันที่ 28 หลังจากนั้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษาจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ในบ่อควบคุมที่ 3 ในช่วงแรก พบว่ามีความเข้มข้นของตะกั่วในดินสูงมาก และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ (ภาพที่ 9A-9C) ซึ่งในบ่อทดลอง (ภาพที่ 9D-9E) ปริมาณตะกั่วในดินของบ่อทดลอง ใน 28 วันแรก มีความเข้มข้นลดลงจากวันเริ่มต้น แต่หลังจากนั้น ปริมาณตะกั่วกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาอีก โดยบ่อทดลองที่ 1 มีปริมาณตะกั่วในดินสูงมาก และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับบ่อทดลองที่ 2 แต่เมื่อสิ้นสุดการศึกษา พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด ในบ่อทดลองที่ 3 มีค่าลดลงในวันที่ 28 และคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา

ตารางที่ 18 ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	15,010.00	12,206.00	24,879.00	22,518.00	15,806.00	19,162.00
14	-	-	-	-	-	-
28	12,273.00	8,752.00	12,278.00	9,930.00	14,575.00	13,300.00
42	-	-	-	-	-	-
56	15,346.00	14,136.00	5,513.00	27,918.00	36,957.00	13,265.00
70	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

2.3.2 ปริมาณตะกั่วในน้ำ

ปริมาณตะกั่วในน้ำในบ่อควบคุมที่ 1 มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาศึกษา โดยมีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ ในบ่อควบคุมที่ 2 ในวันแรกของการศึกษา มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่สามารถตรวจพบได้ และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงคงที่ไปจนถึงวันที่ 42 ที่พบมีปริมาณตะกั่วในน้ำสูงขึ้นมีค่า 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นก็ไม่สามารถตรวจพบตะกั่วในน้ำได้ไปอีก ในบ่อควบคุมที่ 3 มีค่าคงที่จากวัน

เริ่มต้นไปจนถึงวันที่ 42 ของการศึกษา โดยมีปริมาณ น้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้น ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 56

ปริมาณตะกั่วในน้ำในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าคงที่จากวันเริ่มต้นไปจนถึงวันที่ 42 ของ การศึกษา โดยมีปริมาณน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในวันที่ 56 เป็น 2.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และไม่สามารถตรวจพบค่าได้อีกเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ในบ่อทดลองที่ 2 พบว่า มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ ใน 14 วันแรก และมีค่า สูงขึ้นในวันที่ 28 และ 42 เท่ากับ 4.00 และ 9.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นในวันที่ 56 ก็ ไม่สามารถตรวจพบค่าได้อีก ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณตะกั่วในน้ำมีค่าคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา โดยมีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ ดังแสดงในตารางที่ 20

ปริมาณตะกั่วในน้ำของบ่อควบคุมในช่วงแรก มีปริมาณน้อยจนไม่สามารถตรวจ วิเคราะห์ได้ แต่หลังจากนั้นในบ่อควบคุมที่ 2 และ 3 จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ส่วนในบ่อ ทดลองตลอดระยะเวลาที่ศึกษามีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก มีเพียงบ่อทดลองที่ 2 ที่มีค่าแตกต่างจาก บ่อทดลองอื่น โดยพบว่า ปริมาณตะกั่วในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในวันที่ 28-42 และ ลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้เมื่อ สิ้นสุดการศึกษา ส่วนในบ่อทดลองที่ 1 และ 3 มีปริมาณน้อย จนไม่สามารถตรวจพบได้จนถึงสิ้นสุดระยะเวลาที่ ศึกษา มีเพียงในวันที่ 56 เท่านั้นที่ในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าเพิ่มเล็กน้อย และหลังจากนั้นก็ไม่สามารถตรวจพบได้

2.3.3 ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียว

ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวในบ่อทดลองที่ 1 ในวันแรกของการศึกษามีค่า 212.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และหลังจากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 มีค่า 233.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 120.00 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 42 มีค่าเฉลี่ย 595.00 ไมโครกรัม ต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าลดลงในวันที่ 56 พบว่ามีค่า 180.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก (ภาพที่ 10A) ในบ่อทดลองที่ 2 ปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบในสาหร่ายสีเขียวในวันแรก ของการศึกษา มีค่าเฉลี่ย 272.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยในวันที่ 14 และ 28 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 254.00 และ 289.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนัก เปียก ตามลำดับ แต่ในวันที่ 42 มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 302.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

น้ำหนักเปียก (ภาพที่ 10B) ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวในวันแรกของการศึกษา มีค่าเฉลี่ย 344.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมีความเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในวันที่ 14 และมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ย 678.00 และ 2,719.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ตามลำดับ และมีค่าลดลงต่ำสุดเมื่อสิ้นสุดการศึกษา มีค่าเท่ากับ 40.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (ภาพที่ 10C) ดังแสดงในตารางที่ 20

ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวในบ่อทดลอง ใน 28 วันแรกมีความเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในบ่อทดลองที่ 3 มีค่าสูงสุดในวันที่ 28 ในบ่อทดลองที่ 1 และ 2 มีปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสูงสุดในวันที่ 42 หลังจากนั้นค่าจะลดลง

ตารางที่ 19 ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	nd	nd	nd	nd	nd	nd
14	nd	nd	nd	nd	nd	nd
28	nd	nd	nd	nd	4.00	nd
42	nd	2.00	nd	nd	9.00	nd
56	nd	nd	2.00	2.00	nd	nd
70	-	-	-	nd	-	-

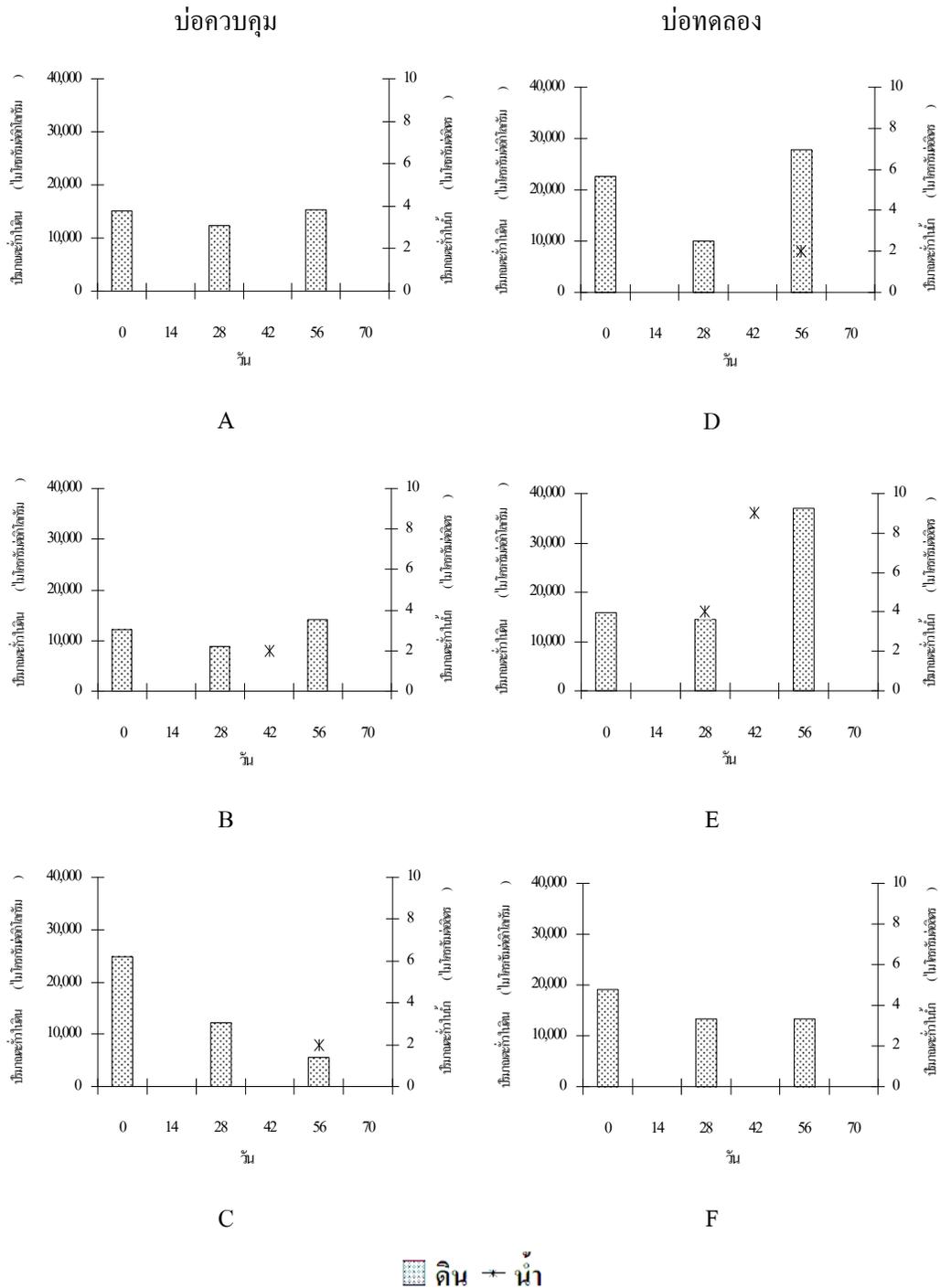
หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<1.00)

ตารางที่ 20 ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่ายใต้น้ำของบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	212.00	272.00	344.00
14	233.00	254.00	678.00
28	120.00	289.00	2,719.00
42	595.00	302.00	40.00
56	180.00	-	-
70	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 9 ปริมาณตะกั่วไนโตรเจนในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณตะกั่วไนโตรเจนในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง

เมื่อนำข้อมูลปริมาณตะกั่วที่พบในสาหร่ายสีเขียวและในน้ำ มาคำนวณค่า concentration factor พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 65.08 เท่า และเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 71.53 เท่า หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 36.84 เท่า และมีค่า concentration factor สูงสุดในวันที่ 42 โดยมีค่าเท่ากับ 182.66 เท่า และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 56 เท่ากับ 27.63 เท่า ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 83.50 เท่า ซึ่งเป็นค่าสูงสุด และมีค่าลดลงในวันที่ 14 เท่ากับ 77.98 เท่า และหลังจากนั้นก็มีการลดลงอีกในวันที่ 28 และลดลงต่ำสุดในวันที่ 42 โดยมีค่าเท่ากับ 22.18 และ 10.30 เท่า ตามลำดับ และค่า concentration factor ในบ่อทดลองที่ 3 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 28 วันแรก โดยวันแรกของการศึกษา ค่า concentration factor มีค่าเท่ากับ 105.61 เท่า และเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 208.15 เท่า หลังจากนั้นในวันที่ 28 มีค่า concentration factor เพิ่มขึ้นสูงสุด มีค่าเท่ากับ 834.73 เท่า หลังจากนั้นมีการลดลงต่ำสุดเป็น 12.28 เท่า ในวันที่ 42 (ตารางที่ 21)

ค่า concentration factor ของบ่อทดลอง ในบ่อทดลองที่ 1 มีค่า concentration factor ค่าสูงสุดในวันที่ 28 โดยสาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่าปริมาณที่มีอยู่ในน้ำได้ถึง 27.63-182.67 เท่า บ่อทดลองที่ 2 ค่าสูงสุดในวันแรกของการศึกษา โดยสาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่าที่มีอยู่ในน้ำได้ถึง 10.30-83.50 เท่า บ่อทดลองที่ 3 มีค่า concentration factor สูงที่สุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 834.73 เท่า ซึ่งมากกว่าบ่อทดลองที่ 1 และ 2 ถึง 5-10 เท่าตัว (ภาพที่ 10D)

เมื่อพิจารณามวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวร่วมกับ ปริมาณตะกั่วในดินและในน้ำ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 16.73 ± 6.63 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งช่วงที่สาหร่ายสีเขียวมีมวลชีวภาพสูงสุดนี้ พบว่า ตะกั่วในดินก็มีค่าลดลง เช่นเดียวกับปริมาณ ตะกั่วในน้ำที่คงที่ ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ในช่วง 42 วันแรก แต่ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวในบ่อมีค่าลดลงต่ำสุด ซึ่งส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายมีค่าต่ำกว่าในวันที่ 42 ซึ่งเป็นช่วงที่มวลชีวภาพมีค่าลดลงจาก วันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 11.90 ± 5.49 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และเป็นช่วงที่ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุด เท่ากับ 182.70 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง จึงมีค่า concentration factor สูงสุด เท่ากับ 182.67 เท่า หลังจากนั้น เมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวลดลง ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวก็มีค่าลดลงด้วย ทำให้ปริมาณตะกั่วในน้ำมีค่าสูงขึ้นมาเล็กน้อย เนื่องจากสาหร่ายดูดซับตะกั่วได้ลดลง ค่า concentration factor จึงมีค่าลดลงในวันที่ 56

ในบ่อทดลองที่ 2 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่า สูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 17.68 ± 4.80 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งในช่วงที่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีมวลชีวภาพสูงสุด ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบ่อที่มีค่าเพิ่มขึ้น และตะกั่วในดินก็มีค่าลดลงต่ำสุด แต่ปริมาณตะกั่วในน้ำมีค่าสูงขึ้นจากวันเริ่มต้นเล็กน้อย จึงส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 22.18 เท่า แต่ในช่วงวันแรกถึงวันที่ 14 ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มต้นและมีค่ามวลชีวภาพเฉลี่ยในบ่อเท่ากับ 7.90-10.06 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร พบว่า มีค่า concentration factor สูงสุด เท่ากับ 77.98-83.50 เท่า หลังจากนั้นในวันที่ 42 เมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินลดลง กลับพบว่า ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่า เพิ่มขึ้นสูงสุด เช่นเดียวกับ ในน้ำก็มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ทำให้ค่า concentration factor จึงมีค่าลดลงต่ำสุด เท่ากับ 10.30 เท่า จากการที่ concentration factor มีค่าในทิศทางตรงกันข้ามกับมวลชีวภาพ ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน อาจเกิดจากการสะสมของตะกั่วในดินตะกอนที่พบว่ามีค่า สูงมาก ซึ่งอาจทำปฏิกิริยากับไอออนในชั้นของน้ำ เกิดการแตกตัวละลายในน้ำ จึงส่งผลให้มีปริมาณตะกั่วในน้ำสูงมากในช่วงนี้ แม้ว่าสาหร่ายจะสามารถดูดซับตะกั่วที่ละลายในน้ำได้เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังพบว่าการดูดซับได้ต่ำกว่าปริมาณที่มีในน้ำ และปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มต้นอยู่ก่อนแล้ว ในขณะที่ปริมาณตะกั่วในน้ำในช่วง 14 วันแรก มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้จึงทำให้มีค่า concentration factor สูง

ในบ่อทดลองที่ 3 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่า สูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 10.82 ± 3.36 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และมีปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสูงสุด เท่ากับ 834.73 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ซึ่งพบว่า ในขณะที่ ปริมาณตะกั่วในดินมีค่าลดลง เช่นเดียวกับปริมาณตะกั่วในน้ำที่คงที่ ซึ่งตรวจพบไม่ได้ตลอดระยะเวลาศึกษา จึงส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 834.73 เท่า หลังจากนั้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษา มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าลดลง ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าลดลงต่ำสุด จึงส่งผลให้ค่า concentration factor จึงมีค่าลดลงต่ำสุดด้วยเช่นกัน เช่นเดียวกับช่วง 14 วันแรกของการศึกษาที่ค่าเฉลี่ย มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ค่า concentration factor จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

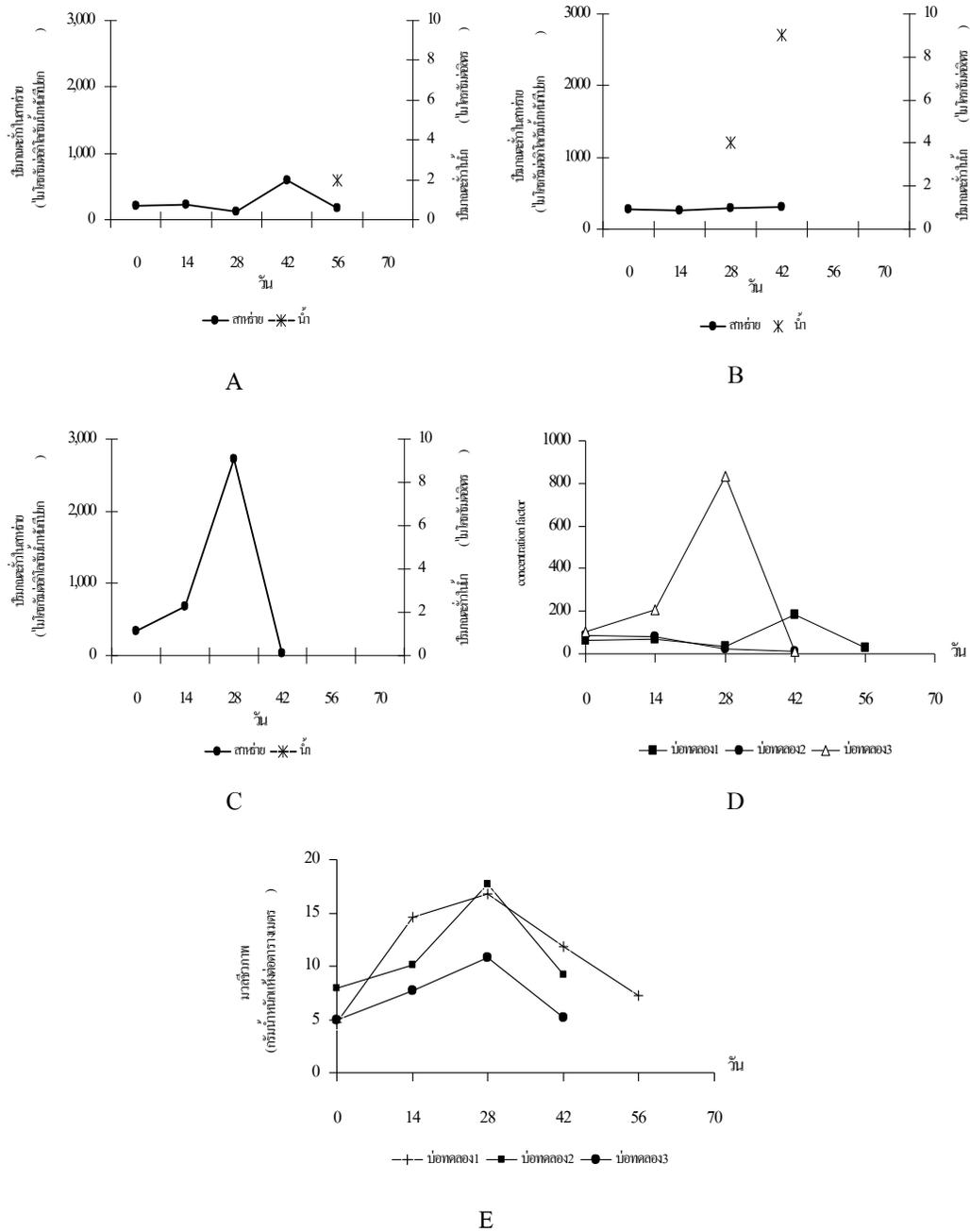
ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในบ่อทดลองที่ 1 เท่ากับ 36.84-182.67 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่า 77.98-92.70 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 3 มีค่า 12.28-834.73 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในการศึกษาของ Caliceti *et al.* (2002) ในสาหร่าย 7 ชนิด ได้แก่ *Ulva rigida*, *Gracilaria gracilis*, *Porphyra*

leucosticte, *Grateloupia doryphora*, *Undaria pinnatifida*, *Fucus virsoides* และ *Cystoseira barbata* ในพื้นที่แหล่งอุตสาหกรรมใน Venice lagoon จากการตรวจวิเคราะห์เหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม และสารหนู พบว่า สาหร่าย *U. rigida* มีปริมาณตะกั่วเฉลี่ยเท่ากับ $7,300.00 \pm 6,400.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แต่พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับ ปริมาณ ตะกั่วในสาหร่าย จากการศึกษาของ Richardson (2009) ที่พบว่ามีค่าระหว่าง 230.00-8,140.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และมีค่าสอดคล้องกับการศึกษาของ Muller *et al.* (1993) ที่ พบว่าปริมาณตะกั่วในสาหร่าย *E. intestinalis* ในบ่อเพาะเลี้ยงที่ใช้น้ำทะเลธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ $1,000.00 \pm 800.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายไส้ไก่ใน ธรรมชาติบริเวณปากแม่น้ำ พบว่ามีค่าสูงมาก โดยมีค่าเท่ากับ 28,000.00-47,000.00 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 21 ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียว ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของบ่อกดลอง

วันที่	บ่อกดลอง								
	บ่อ 1			บ่อ 2			บ่อ 3		
	ปริมาณ ตะกั่วใน สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ ตะกั่วใน สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ ตะกั่วใน สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor
0	65.08	1.00	65.08	83.50	1.00	83.50	105.61	1.00	105.61
14	71.53	1.00	71.53	77.98	1.00	77.98	208.15	1.00	208.15
28	36.84	1.00	36.84	88.70	4.00	22.18	834.73	1.00	834.73
42	182.67	1.00	182.67	92.70	9.00	10.30	12.28	1.00	12.28
56	55.30	2.00	27.63	-	1.00	-	-	1.00	-
70	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 10 ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในสาหร่ายใต้น้ำ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และปริมาณตะกั่วเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับตะกั่วของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายใต้น้ำในบ่อทดลอง

เมื่อพิจารณาช่วงที่สาหร่ายไส้ไก่มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นใน 28 วันแรก สามารถคำนวณ ปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายไส้ไก่ดูดซับได้ในบ่อพื้นที่ทั้งหมด 4 ไร่ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 สาหร่าย ไส้ไก่สามารถดูดซับตะกั่วได้ มีค่าเท่ากับ 1.97-6.67 มิลลิกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 สาหร่ายไส้ไก่ สามารถดูดซับตะกั่วได้เท่ากับ 4.22-10.04 มิลลิกรัม และในบ่อทดลองที่ 3 สาหร่ายไส้ไก่สามารถ ดูดซับตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 3.35-57.82 มิลลิกรัม ดังแสดงค่าในตารางผนวกที่ 3

2.4 การศึกษาปริมาณสังกะสีในดิน น้ำ และสาหร่ายไส้ไก่

2.4.1 ปริมาณสังกะสีในดิน

ปริมาณสังกะสีของบ่อควบคุมที่ 1 ในวันแรกของการศึกษามีค่าเฉลี่ยเริ่มต้น 21,689 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีความเพิ่มขึ้นในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ย 22,329 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม และในวันที่ 56 มีความเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 24,654 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 11A) ในบ่อควบคุมที่ 2 ในวันแรกของการศึกษามีค่า 17,397 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีความเพิ่ม สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในวันที่ 28 และมีความสูงสุดในวันที่ 56 โดยมีค่า 18,889 และ 27,140 ไมโครกรัม ต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 11B) ในบ่อควบคุมที่ 3 เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 15,853 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณ สังกะสีในดินมีปริมาณสูงขึ้น ในวันที่ 28 มีค่า 19,144 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และหลังจากนั้นมีความลดลงในวันที่ 56 โดยมีค่าเฉลี่ย 13,085 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 11C)

ปริมาณสังกะสีในดินของบ่อทดลองที่ 1 เริ่มต้นมีค่า 13,240 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นมีความเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 15,001 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในวันที่ 28 และในวันที่ 56 มีความลดลงเหลือ 14,856 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 11D) ในบ่อทดลองที่ 2 ในวันแรกเท่ากับ 20,689 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีความเพิ่มขึ้นสูงสุดวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 34,293 ไมโครกรัม ต่อกิโลกรัม แต่หลังจากนั้นกลับพบว่ามีค่าลดลงในวันที่ 56 มีค่าเท่ากับ 17,457 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม (ภาพที่ 11E) ในบ่อทดลองที่ 3 ในวันแรกของการศึกษามีปริมาณ 18,916 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม หลังจากนั้นเพิ่มขึ้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21,869 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในวันที่ 28 และมีความ ลดลงเล็กน้อยในวันที่ 56 โดยมีค่าเท่ากับ 21,085 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 11F) ดังแสดงค่า ในตารางที่ 23

ปริมาณสังกะสีในดินของบ่อควบคุมที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากวันแรกและมีค่าสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการศึกษาในวันที่ 56 แต่ในบ่อควบคุมที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้นจนมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง สำหรับปริมาณสังกะสีในบ่อทดลองที่ 1 ในวันที่ 28 มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าที่ตรวจพบในวันเริ่มต้น หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงจากเดิมเพียงเล็กน้อย บ่อทดลองที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ซึ่งมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 หลังจากนั้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ตรวจพบว่า มีค่าจะลดลงเกือบเท่าตัว บ่อทดลองที่ 3 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 28 วัน พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย และคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา

ตารางที่ 23 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	21,689.00	17,397.00	15,853.00	13,240.00	20,689.00	18,916.00
14	-	-	-	-	-	-
28	22,329.00	18,889.00	19,144.00	15,001.00	34,293.00	21,869.00
42	-	-	-	-	-	-
56	24,654.00	27,140.00	13,085.00	14,856.00	17,457.00	21,085.00
70	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

2.4.2 ปริมาณสังกะสีในน้ำ

ปริมาณสังกะสีในน้ำของบ่อควบคุมที่ 1 มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาศึกษา โดยมีค่าเริ่มต้น 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และในวันที่ 14 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 7.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในวันที่ 28-56 โดยตลอดระยะเวลาศึกษามีค่าสูงสุด 7.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ในบ่อควบคุมที่ 2 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำในวันแรก มีค่า 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 เป็น 8.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้น ในวันที่ 28 มีค่าลดลงต่ำสุด เท่ากับ 3.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 42 มีค่า 7.00 ไมโครกรัม

ต่อลิตร และมีค่าคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา ในบ่อควบคุมที่ 3 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำในวันเริ่มต้นมีค่า 9.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีการลดลงในวันที่ 14 เป็น 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และกลับมามีค่าเท่ากับวันแรกอีกครั้งในวันที่ 28 ซึ่งเป็นค่าสังกะสีในน้ำสูงสุด และมีค่าลดลงในวันที่ 42 เท่ากับ 3.00 ไมโครกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการศึกษา พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.00 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปริมาณสังกะสีในน้ำในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าเริ่มต้น 10.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีการลดลงในวันที่ 14 เท่ากับ 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และในวันที่ 28 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 16.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีการลดลงต่ำสุด เท่ากับ 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่าเริ่มต้น 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 เท่ากับ 10.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีการลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 3.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 42 พบว่า สังกะสีในน้ำมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 23.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาก็มีการลดลงอีกครั้ง ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าเริ่มต้นเฉลี่ย 6.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นมีค่าไปในทิศทางเดียวกับบ่อทดลองที่ 2 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 เท่ากับ 9.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วมีการลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 7.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งสังกะสีในน้ำมีค่าสูงสุดในวันที่ 42 โดยมีค่าเท่ากับ 21.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และลดลงเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ดังแสดงค่าในตารางที่ 24

ปริมาณสังกะสีในน้ำของบ่อควบคุมที่ 1 ตลอดระยะเวลาการศึกษา สังกะสีในน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่ในบ่อควบคุมที่ 2 และ 3 ที่มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นสลับกันไป จนถึงสิ้นสุดการศึกษา ส่วนปริมาณสังกะสีในน้ำในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการศึกษา โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 หลังจากนั้นค่าจะลดลง แต่ในบ่อทดลองที่ 2 และ 3 มีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 42

ตารางที่ 24 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	6.00	6.00	9.00	10.00	6.00	6.00
14	7.00	8.00	6.00	6.00	10.00	9.00
28	6.00	3.00	9.00	16.00	3.00	7.00
42	7.00	7.00	3.00	6.00	23.00	21.00
56	6.00	7.00	7.00	8.00	6.00	8.00
70	-	-	-	6.00	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

2.4.3 ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายสีเขียว

ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายสีเขียวใน บ่อทดลองที่ 1 ในวันแรกของการศึกษามีค่า 7,558 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 มีค่า 12,270 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 1,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นพบว่า มีปริมาณเพิ่มขึ้นในวันที่ 42 และ 56 มีค่าเฉลี่ย 2,219 และ 3,828 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (ภาพที่ 12A) ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่าเริ่มต้นเฉลี่ย 2,500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 2,845 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมียาลดลงในวันที่ 28 เป็น 2,155 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก แล้วจึงมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 42 โดยมีค่าเท่ากับ 13,582 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (ภาพที่ 12B)

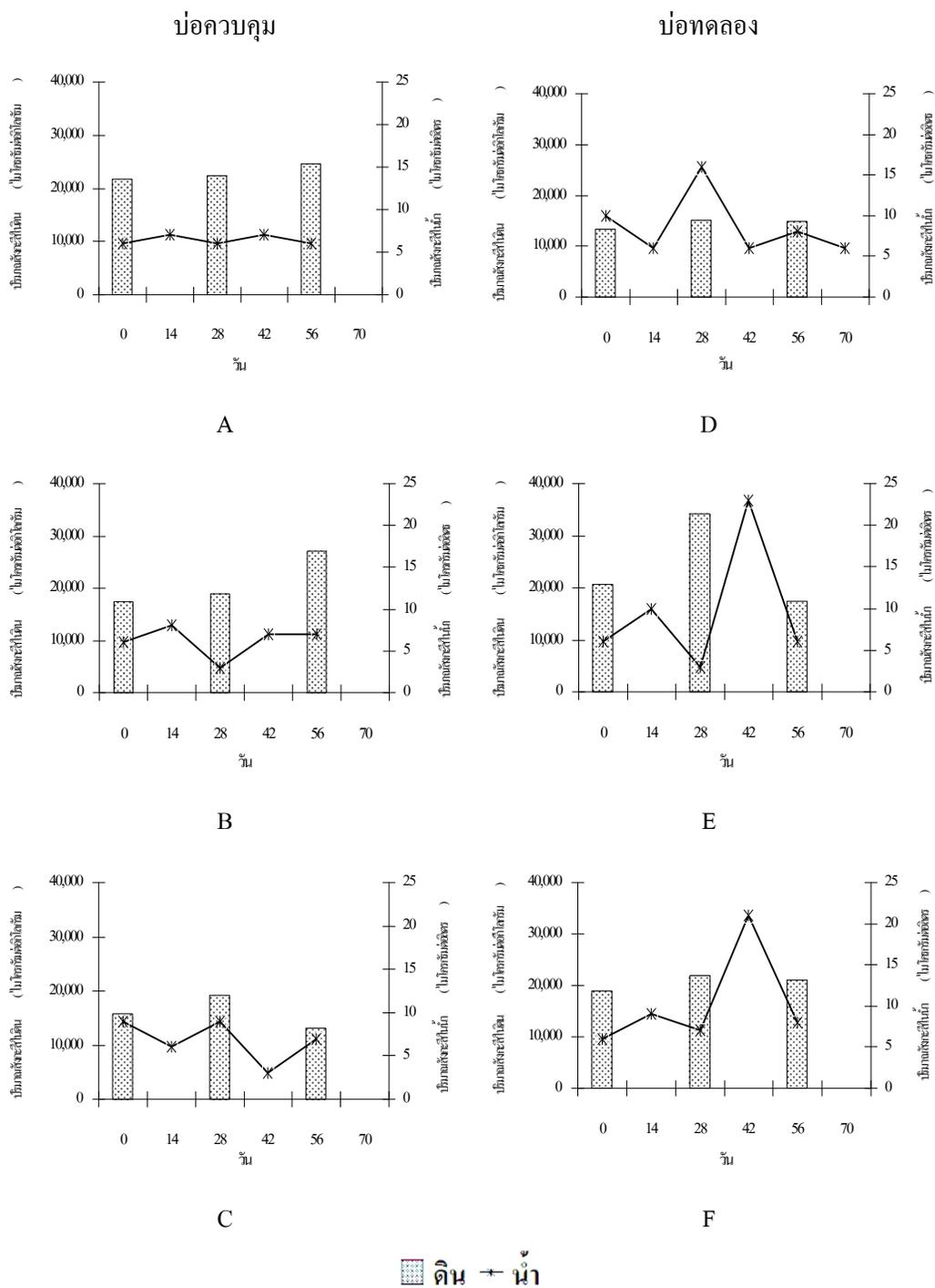
ตารางที่ 25 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ของบ่อทดลอง

วันที่	ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	7,558.00	2,500.00	9,125.00
14	12,270.00	2,845.00	11,574.00
28	1,000.00	2,155.00	1,191.00
42	2,219.00	13,582.00	5,546.00
56	3,828.00	-	-
70	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ในวันแรกของการศึกษา มีค่าเฉลี่ย 9,125 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมีความเพิ่มสูงขึ้นและมีความสูงสุดในวันที่ 14 เท่ากับ 11,574 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีความลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ย 1,191 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีความเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5,546 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก เมื่อสิ้นสุดการศึกษา (ภาพที่ 12C) ดังแสดงในตารางที่ 25

ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลองที่ 1 และ 3 มีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยมีความสูงสุดในวันที่ 14 หลังจากนั้นมีความลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 แล้วค่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษา แต่ในบ่อทดลองที่ 2 มีปริมาณสังกะสีค่อนข้างคงที่ในช่วงเดือนแรก และมีความเพิ่มสูงขึ้น จนมีความสูงสุดในวันที่ 42



ภาพที่ 11 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง 3

เมื่อนำข้อมูลปริมาณสังกะสีที่พบในสาหร่ายไส้ไก่ และในน้ำ มาคำนวณค่า concentration factor พบว่า ในบ่อดทดลองที่ 1 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 232.03 เท่า และเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 627.82 เท่า หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 19.19 เท่า และในวันที่ 42 และ 56 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าเท่ากับ 113.54 และ 146.90 เท่า ในบ่อดทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 127.92 เท่า และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 14 เท่ากับ 87.34 เท่า และหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 220.53 เท่า และในวันที่ 42 จึงมีค่าลดลงอีก โดยมีค่าเท่ากับ 181.29 เท่า และค่า concentration factor ในบ่อดทดลองที่ 3 พบว่า มีค่าสูงสุดในวันแรก โดยมีค่าเท่ากับ 466.90 เท่า หลังจากนั้นก็มีค่าลดลงในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 52.23 เท่า และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 52.23 เท่า และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาจึงพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 81.08 เท่า (ตารางที่ 26)

ค่า concentration factor ในบ่อดทดลองที่ 1 มีค่าสูงสุดในวันที่ 14 และมีค่าต่ำสุดในวันที่ 28 โดยสามารถดูดซับสังกะสีได้มากกว่าสังกะสีที่มีในน้ำได้ถึงประมาณ 19.19-232.03 เท่า แต่บ่อดทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor ต่ำสุดในวันที่ 14 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 โดยสามารถดูดซับสังกะสีได้มากกว่าสังกะสีที่มีในน้ำได้ประมาณ 87.34-220.53 เท่า และบ่อดทดลองที่ 3 มีค่าสูงสุดในวันที่ 1 และมีค่าต่ำสุดในวันที่ 28 โดยสามารถดูดซับสังกะสีได้มากกว่าสังกะสีที่มีในน้ำได้ประมาณ 52.23-466.90 เท่า ดังภาพที่ 12D

เมื่อพิจารณามวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ร่วมกับ ปริมาณสังกะสีในดินและในน้ำ พบว่า ในบ่อดทดลองที่ 1 ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไส้ไก่มีค่า สูงสุดในวันที่ 14 เท่ากับ 3,767.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ ในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 14.57 ± 8.37 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าลดลงต่ำสุดเช่นกัน จึงพบว่า มีค่า concentration factor สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 627.82 เท่า แต่ในช่วงที่ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่มีค่าสูงสุดในวันที่ 28 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.73 ± 6.63 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร พบว่า ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไส้ไก่มีค่าต่ำสุด รวมทั้งปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด และยังพบว่ามี การสะสมของสังกะสีในดินตะกอนสูงสุด จึงส่งผลให้ค่า concentration factor มีค่าต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 19.19 เท่า หลังจากนั้นเมื่อปริมาณสังกะสีในน้ำลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากสาหร่ายไส้ไก่ดูดซับสังกะสีในน้ำได้ดี จนมีปริมาณสูงขึ้นในวันที่ 42 และ 56 และปริมาณสังกะสีในดินก็มีค่าลดลงเช่นกัน ขณะเดียวกันค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อก็คงมีค่าสูงอยู่จึงพบว่า ค่า concentration factor เพิ่มขึ้น

ในบ่อทดลองที่ 2 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 17.68 ± 4.80 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร แต่พบว่าปริมาณสังกะสีในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 662.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และปริมาณสังกะสีในน้ำก็มีค่าลดลงต่ำสุดด้วย ทำให้ค่า concentration factor ในการดูดซับสังกะสีของสาหร่ายมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 220.53 เท่า เนื่องจากปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าน้อยมาก และพบว่าสังกะสีในดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 ซึ่งอาจเกิดจากการสะสมของสังกะสีในดิน โดยสังกะสีมีความสามารถละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย บางส่วนจะถูกดูดซับโดยอนุภาคสารแขวนลอยในน้ำ หลังจากนั้นจะตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ (McNeely *et al.*, 1979) ทำให้ในน้ำมีค่าลดลงต่ำสุด หลังจากนั้น ในวันที่ 42 เมื่อสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถดูดซับสังกะสีได้สูงสุด กลับพบว่าปริมาณสังกะสีในน้ำก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้มีค่า concentration factor ต่ำกว่าในวันที่ 28

ในบ่อทดลองที่ 3 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 10.82 ± 3.36 กรัม น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งพบว่า ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าลดลงต่ำมาก ในช่วงนี้ เช่นเดียวกับในบ่อทดลองที่ 1 และ 2 และปริมาณสังกะสีในดินที่มีผลสูงขึ้นเช่นเดียวกับในบ่อทดลองที่ 1 และ 2 รวมทั้งปริมาณสังกะสีในน้ำก็มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วง 28 วันแรก จึงส่งผลให้ค่า concentration factor มีค่าต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 52.23 เท่า ต่างจากช่วงแรกที่ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูง โดยมีค่าเท่ากับ 2,801.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าต่ำสุด จึงมีค่า concentration factor สูงที่สุดในวันแรก เมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 พบว่า ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายก็มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ปริมาณสังกะสีในน้ำก็มีค่าต่ำ จึงส่งผลให้มีค่า concentration factor สูงด้วย

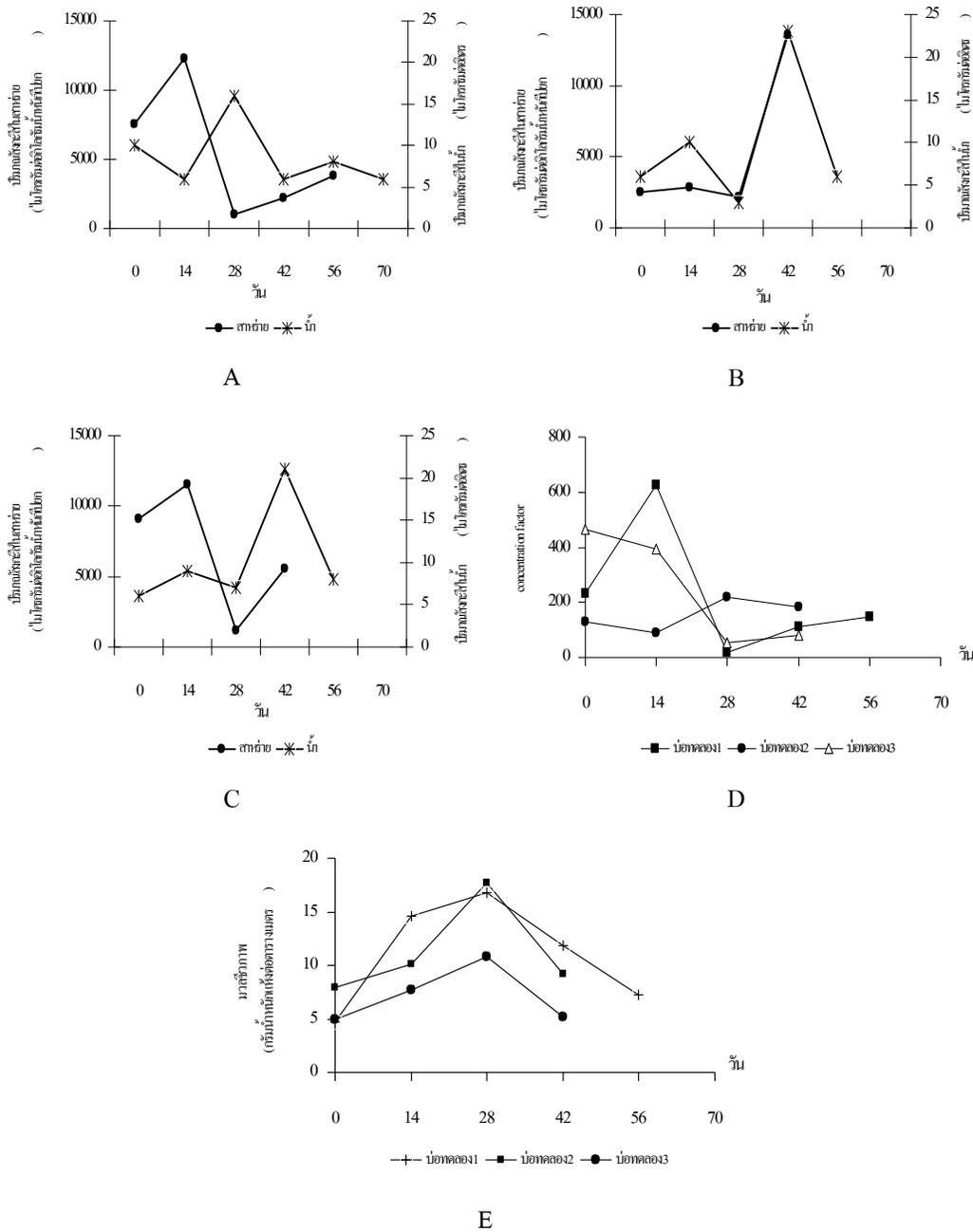
เมื่อพิจารณามวลชีวภาพเฉลี่ยของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน หลังจากที่มีมวลชีวภาพมีค่าลดลง พบว่า ปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งอาจเกิดจากการตกตะกอนลงสู่พื้นน้ำ ทำให้ปริมาณสังกะสีที่ตรวจพบในน้ำมีค่าต่ำลงจนสิ้นสุดการศึกษา ปริมาณสังกะสีที่พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าสูงสุดในช่วงที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตในบ่อ โดยมวลชีวภาพของบ่อทดลองที่ 1 มีค่าสูงสุดในช่วงวันที่ 14-28 ซึ่งก็พบว่าปริมาณสังกะสีในสาหร่ายมีค่าสูงสุดในวันที่ 14 แต่หลังจากนั้นก็กลับพบว่ามีปริมาณต่ำมากในวันที่ 28 เช่นเดียวกับบ่อทดลองที่ 2 และ 3 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าสังกะสีในบ่อมีปริมาณคงที่ต่อเนื่องมาตั้งแต่วันที่ 14 แต่หลังจากนั้นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีการเจริญเติบโตและมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 ปริมาณสังกะสีที่มีในสาหร่ายจึงมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนสาหร่ายเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณสังกะสีมีจำกัด ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายจึงลดลงตามจำนวนสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นในบ่อ

ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลองที่ 1 มีค่า 307.00-3,767.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่าอยู่ที่ 662.00-4,170.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 3 มีค่าเท่ากับ 366.00-3,553.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง สอดคล้องกับการศึกษาของ Muller *et al.* (1993) ที่พบว่าในสาหร่าย *E. intestinalis* ในบ่อเพาะเลี้ยงที่ใช้น้ำทะเลธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 11,600.00±7,000.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แต่มีค่าต่ำกว่าปริมาณที่พบในธรรมชาติ จากการศึกษาของ Richardson (2009) ที่พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5,320.00-130,000.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และ ในการศึกษาปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายบริเวณ Tyrrhenian coastal areas พบว่า สาหร่าย *Ulva lactuca* มีการสะสมสังกะสีสูงสุดเท่ากับ 54,000.00±5,000.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Conti and Cecchetti, 2003) ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณสังกะสีที่พบในสาหร่ายของบ่อทดลองมาก

ตารางที่ 26 ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไส้ไก่ ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับสังกะสีของบ่อดลอง

วันที่	บ่อดลอง								
	บ่อ 1			บ่อ 2			บ่อ 3		
	ปริมาณ สังกะสีใน สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ สังกะสีใน สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ สังกะสีใน สาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor
0	2,320.00	10.00	232.03	768.00	6.00	127.92	2,801.00	6.00	466.90
14	3,767.00	6.00	627.82	873.00	10.00	87.34	3,553.00	9.00	394.80
28	307.00	16.00	19.19	662.00	3.00	220.53	366.00	7.00	52.23
42	681.00	6.00	113.54	4,170.00	23.00	181.29	1,703.00	21.00	81.08
56	1,175.00	8.00	146.90	-	6.00	-	-	8.00	-
70	-	6.00	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 12 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียว (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และ ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อกดอง 1, (B) บ่อกดอง 2, (C) บ่อกดอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับสังกะสีของบ่อกดอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อกดอง

การศึกษาครั้งนี้ เมื่อพิจารณาช่วงที่มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อเพิ่มขึ้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำ 0.1 เท่าของค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง ความเข้มข้นของสังกะสีในสาหร่ายสีเขียวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 662.00 ± 174.62 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่า 220.53 ± 51.83 เท่า และเมื่อระดับความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเพิ่มสูงขึ้น 0.1-0.5 เท่าของค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง ความเข้มข้นของสังกะสีในสาหร่ายมีค่าเท่ากับ $1,844.38 \pm 1,434.70$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่า 251.03 ± 221.95 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 27 ซึ่งความเข้มข้นของสังกะสีที่ตรวจพบในน้ำครั้งนี้จะมีค่าต่ำกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ปลอดภัยและไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง แต่ยังคงพบว่าสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่ำ และเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสูงขึ้น สาหร่ายสีเขียวก็สามารถดูดซับสังกะสีได้เพิ่มขึ้น ทำให้มีค่า concentration สูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 27 ปริมาณสังกะสีเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวและค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ

บ่อดทดลอง		
ระดับความเข้มข้นของสังกะสี ในน้ำ ($\mu\text{g/L}$)	ความเข้มข้นของสังกะสีใน สาหร่าย ($\mu\text{g/kg dry weight}$)	concentration factor
5.00 (0.1 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	662.00 ± 174.62 (n=3)	220.53 ± 51.83 (n=3)
>5.00-25.00 (0.1-0.5 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	$1,844.38 \pm 1,434.70$ (n=6)	251.03 ± 221.95 (n=6)
>25.00-125.00 (0.5-2.5 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	-	-

เมื่อพิจารณาช่วงที่สาหร่ายไส้ไก่มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นใน 28 วันแรก สามารถคำนวณ ปริมาณสังกะสีที่สาหร่ายไส้ไก้ดูดซับได้ในบ่อพื้นที่ทั้งหมด 4 ไร่ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 สาหร่าย ไส้ไก่สามารถดูดซับสังกะสีได้เท่ากับ 32.87-351.35 มิลลิกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 สาหร่ายไส้ไก่ สามารถดูดซับสังกะสีได้เท่ากับ 38.81-74.91 มิลลิกรัมและในบ่อทดลองที่ 3 สาหร่ายไส้ไก่สามารถ ดูดซับสังกะสีได้มีค่าเท่ากับ 25.35-174.31 มิลลิกรัม ดังแสดงค่าในตารางผนวกที่ 4

2.5 การศึกษาปริมาณแคดเมียมในดิน น้ำ และสาหร่ายไส้ไก่

2.5.1 ปริมาณแคดเมียมในดิน

ปริมาณแคดเมียมในดินของบ่อควบคุมที่ 1 ในวันแรกของการศึกษามีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มขึ้นจนมี ค่าสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีปริมาณ ลดลงมีค่า 8.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อควบคุมที่ 2 มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในดินในวันแรก ของการศึกษา มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ หลังจากนั้นใน วันที่ 28 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 16.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และลดลงเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุด การศึกษา โดยมีค่า 11 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อควบคุมที่ 3 มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในดิน เริ่มต้น มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เป็นค่าที่ไม่สามารถตรวจพบได้ หลังจากนั้น มี ปริมาณเพิ่มขึ้นในวันที่ 28 เท่ากับ 7.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีปริมาณลดลง เล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 3.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 13A-13C)

ปริมาณแคดเมียมในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าเริ่มต้นในวันแรกน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัม ต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 มีเฉลี่ย 21.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าลดลงในวันที่ 56 เท่ากับ 7.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อ ทดลองที่ 2 ไม่สามารถตรวจพบได้ในวันเริ่มต้น โดย มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มขึ้นในวันที่ 28 มีค่า 37.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และหลังจากนั้นพบว่ามี ค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 56 โดยมีค่า 46.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อทดลองที่ 3 ในวันแรก ของการศึกษามีปริมาณ น้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ หลังจาก นั้นมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในวันที่ 28 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 56 โดยมีค่า 3.00 และ 38.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงค่าในตารางที่ 28

ปริมาณแคะเมียมในดินของบ่อควบคุมทุกบ่อในวันแรกของการศึกษา มีปริมาณน้อยมาก โดยมีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการ และพบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ผลที่ได้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 แล้วหลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และปริมาณแคะเมียมในดินของบ่อทดลองก่อนเริ่มการศึกษา มีผลเช่นเดียวกับในบ่อควบคุม ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการ ในบ่อทดลองที่ 2 และ 3 ปริมาณแคะเมียมในดินมีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องในวันที่ 28 และมีค่าสูงสุดในช่วงก่อนสิ้นสุดการศึกษา (ภาพที่ 13D-13F)

ตารางที่ 28 ปริมาณแคะเมียมเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วัน	ปริมาณแคะเมียมเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 4	บ่อ 5	บ่อ 6
0	nd	nd	nd	nd	nd	nd
14	-	-	-	-	-	-
28	22.00	16.00	7.00	21.00	37.00	3.00
42	-	-	-	-	-	-
56	8.00	11.00	3.00	7.00	46.00	38.00
70	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<1.00)

2.5.2 ปริมาณแคะเมียมในน้ำ

ปริมาณแคะเมียมในน้ำในบ่อควบคุมที่ 1, 2 และ 3 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 29) เช่นเดียวกับในบ่อทดลอง ที่พบว่า บ่อทดลองทุกบ่อปริมาณแคะเมียมในน้ำก็ไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกัน

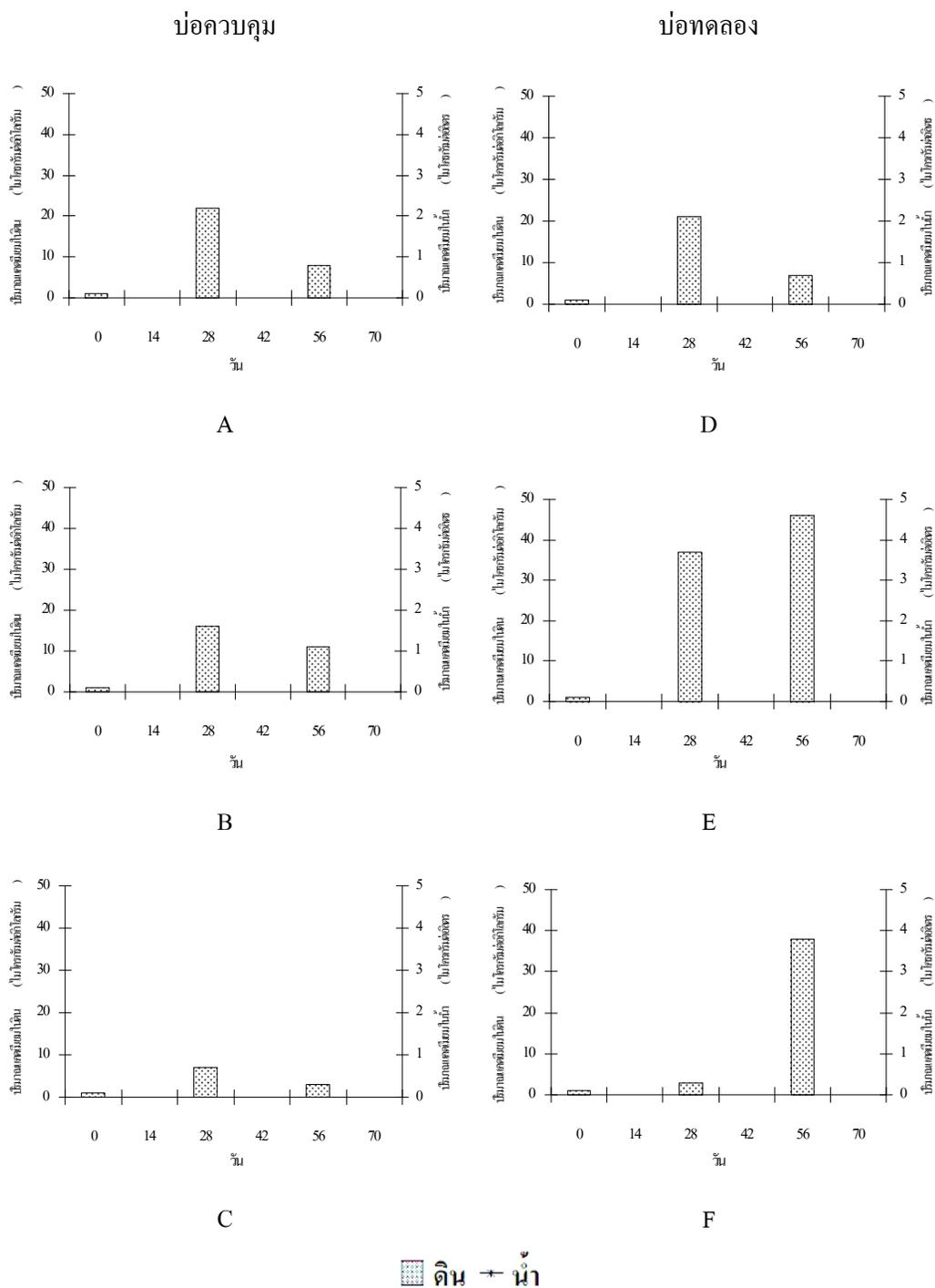
2.5.3 ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่

ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ใน บ่อทดลองที่ 1 ในวันเริ่มต้นมีค่าสูงสุด เท่ากับ 29.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และหลังจากนั้นในวันที่ 14 มีค่าลดลงเป็น 25.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 มีค่าน้อยกว่า 20.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการ และมีปริมาณเพิ่มขึ้นอีกในวันที่ 42 มีค่าเฉลี่ย 25.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และไม่สามารถตรวจพบได้เมื่อสิ้นสุดการศึกษาในบ่อทดลองที่ 2 ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ในวันแรก พบว่า มีค่าเฉลี่ย 22.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้ในวันที่ 14 และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 25.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ในวันที่ 28 และมีค่าคงที่ไปจนสิ้นสุดการศึกษา ในบ่อทดลองที่ 3 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่ายไส้ไก่ในวันแรกของการศึกษามีค่าเท่ากับ 23.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมีความเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 โดยมีค่าเฉลี่ย 34.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าลดลงเหลือ 25.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 30 ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ของแต่ละบ่อทดลอง มีค่าค่อนข้างคงที่และอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาที่ศึกษาเพียงเล็กน้อย เท่านั้น (ภาพที่ 14A-14C)

ตารางที่ 29 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วัน	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	nd	nd	nd	nd	nd	nd
14	nd	nd	nd	nd	nd	nd
28	nd	nd	nd	nd	nd	nd
42	nd	nd	nd	nd	nd	nd
56	nd	nd	nd	nd	nd	nd
70	-	-	-	nd	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้ทำการเก็บ, nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<1.00)



ภาพที่ 13 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง 3

ตารางที่ 30 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่ายของบ่อทดลอง

วัน	ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	29.00	22.00	23.00
14	25.00	nd	34.00
28	nd	25.00	25.00
42	25.00	25.00	27.00
56	nd	-	-
70	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<20.00)

เมื่อคำนวณค่า concentration factor จากข้อมูลปริมาณแคดเมียมที่พบในสาหร่ายใส่ไถ่ ต่อ ปริมาณแคดเมียมในน้ำ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นสูงสุด เท่ากับ 8.90 เท่า หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงในวันที่ 14 โดยมีค่าเท่ากับ 7.68 เท่า และมีค่าลดลงต่ำสุด ในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 6.14 เท่า และในวันที่ 42 ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าวันที่ 14 และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 56 อีกครั้ง ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 6.75 เท่า และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 14 เท่ากับ 6.14 เท่า และหลังจากนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 7.68 เท่า และคงที่ไปจนถึงวันที่ 42 และค่า concentration factor ในบ่อทดลองที่ 3 พบว่า ในวันแรกมีค่าเท่ากับ 7.06 เท่า และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 10.44 เท่า หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงในวันที่ 28 เท่ากับ 7.68 เท่า และในวันที่ 56 จึงพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8.29 เท่า (ตารางที่ 31) ค่า concentration factor ของบ่อทดลองทุกบ่อมีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อคำนวณน้ำหนักสาหร่ายเป็นน้ำหนักแห้งแล้ว พบว่า ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายใส่ไถ่มีมากกว่าแคดเมียมที่มีในน้ำถึง 6.14-10.44 เท่า (ภาพที่ 14D)

ตารางที่ 31 ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ ในน้ำ และ concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของบ่อดลอง

วัน	บ่อดลอง								
	บ่อ 1			บ่อ 2			บ่อ 3		
	ปริมาณ แคดเมียม ในสาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ แคดเมียม ในสาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ แคดเมียม ในสาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor
0	8.90	1.00	8.90	6.75	1.00	6.75	7.06	1.00	7.06
14	7.68	1.00	7.68	6.14	1.00	6.14	10.44	1.00	10.44
28	6.14	1.00	6.14	7.68	1.00	7.68	7.68	1.00	7.68
42	7.68	1.00	7.68	7.68	1.00	7.68	8.29	1.00	8.29
56	6.14	1.00	6.14	-	1.00	-	-	1.00	-
70	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

เมื่อพิจารณามวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวร่วมกับปริมาณแคดเมียมในดิน ตะกอนและในน้ำ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 16.73 ± 6.63 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร พบว่าไม่สามารถตรวจพบปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียว (มีค่าน้อยกว่า 6.14 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง) และในน้ำ (มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร) ได้ จึงทำให้มีค่า concentration factor ต่ำที่สุด ซึ่งจากการศึกษานี้ ค่า concentration factor มีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากปริมาณแคดเมียมที่พบในสาหร่ายและค่าที่ไม่สามารถตรวจพบได้มีค่าต่างกันไม่มาก ซึ่งในช่วงที่มีมวลชีวภาพสูงสุดนี้ พบว่าแคดเมียมในดินตะกอนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ซึ่งอาจเกิดจากการสะสมตัวของแคดเมียมในดินตะกอน ค่า concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสีเขียว สูงสุดในวันแรกของการศึกษา โดยมีค่าเท่ากับ 8.90 เท่า เนื่องจากมีปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียว มีค่าสูงสุดในขณะที่ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพเริ่มต้นมีค่าต่ำ หลังจากนั้นเมื่อมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวมีค่าลดลงเล็กน้อยในวันที่ 42 โดยมีค่าเท่ากับ 11.89 ± 5.49 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร และสามารถตรวจพบปริมาณแคดเมียมได้อีกครั้งก็พบว่า ค่า concentration factor จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพก็มีค่าลดลงในวันที่ 56 ก็ไม่สามารถตรวจพบปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวได้อีก ส่งผลให้ concentration factor ลดลงด้วย

ในบ่อทดลองที่ 2 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวมีค่า สูงสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 17.68 ± 4.80 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งในช่วงที่สาหร่ายสีเขียวมีมวลชีวภาพสูงสุด พบว่าแคดเมียมในดินมีค่าสูง และ ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียวในบ่อมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเช่นเดียวกัน ส่วนแคดเมียมในน้ำก็ยังไม่สามารถตรวจพบได้ตลอดการศึกษา จึงส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของสาหร่าย สีเขียวมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 7.68 เท่า ซึ่งในช่วง 14 วันแรกที่ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวมีค่าต่ำ ค่า concentration factor ก็มีค่าลดลงไปด้วย

ในบ่อทดลองที่ 3 พบว่า ในวันที่ 14 ที่มีมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวเพิ่มขึ้นเป็น 7.67 ± 4.36 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายสีเขียว มีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 10.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง และปริมาณแคดเมียมในน้ำมีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร จึงส่งผลให้มีค่า concentration factor สูงสุด เท่ากับ 10.44 เท่า ในขณะที่ในวันที่ 28 ที่มีค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 10.82 ± 3.36 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งพบว่า ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายมีค่าไม่สูงนัก มีค่าเท่ากับ 7.68 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ก็พบว่าค่า concentration factor มีค่าต่ำกว่าในวันที่ 14 เพราะในสาหร่ายสีเขียวมีปริมาณ

แคดเมียมต่ำกว่า และเมื่อมวลชีวภาพในสาหร่ายใต้ออกลดลงก่อนสิ้นสุดการศึกษา กลับพบว่าปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายใต้ออกสูงกว่าในวันที่ 28 ซึ่งทำให้มีค่า concentration factor สูงขึ้นด้วย

ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายใต้ออกใน บ่อทดลองที่ 1 เท่ากับ 6.14-8.90 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่าอยู่ที่ 6.14-7.68 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 3 มีค่าเท่ากับ 7.06-10.44 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งตลอดการศึกษามีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันในทุกบ่อ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายสีเขียวชนิดอื่น ซึ่งจากการศึกษาของ นิสราภรณ์ และจิรวุฒน์ (2550) ที่เลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่น (*Caulerpa lentilifera*) ในถังไฟเบอร์กลาสขนาดความจุ 1,000 ลิตร โดยใช้ น้ำที่ทำการเลี้ยงกุ้งทะเลผสมกับน้ำทะเลธรรมชาติ ความเค็ม 30 ppt เมื่อนำสาหร่ายมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก พบว่า มีปริมาณแคดเมียม 80.00-1,400.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งผลของแคดเมียมในการศึกษานี้ เมื่อคำนวณปริมาณสาหร่ายในบ่อทดลองเป็นน้ำหนักเปียกแล้ว ก็ยังพบว่ามีความต่ำกว่าปริมาณที่พบในสาหร่ายพวงองุ่น และในบ่อเลี้ยงสาหร่าย *E. intestinalis* ก็พบว่ามีความแคดเมียมไม่สูงนัก มีค่าเท่ากับ 200.00 ± 35.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Muller et al., 1993) และในสาหร่าย *U. lactuca* มีความแคดเมียมเท่ากับ 210.00 ± 50.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Conti and Cecchetti, 2003)

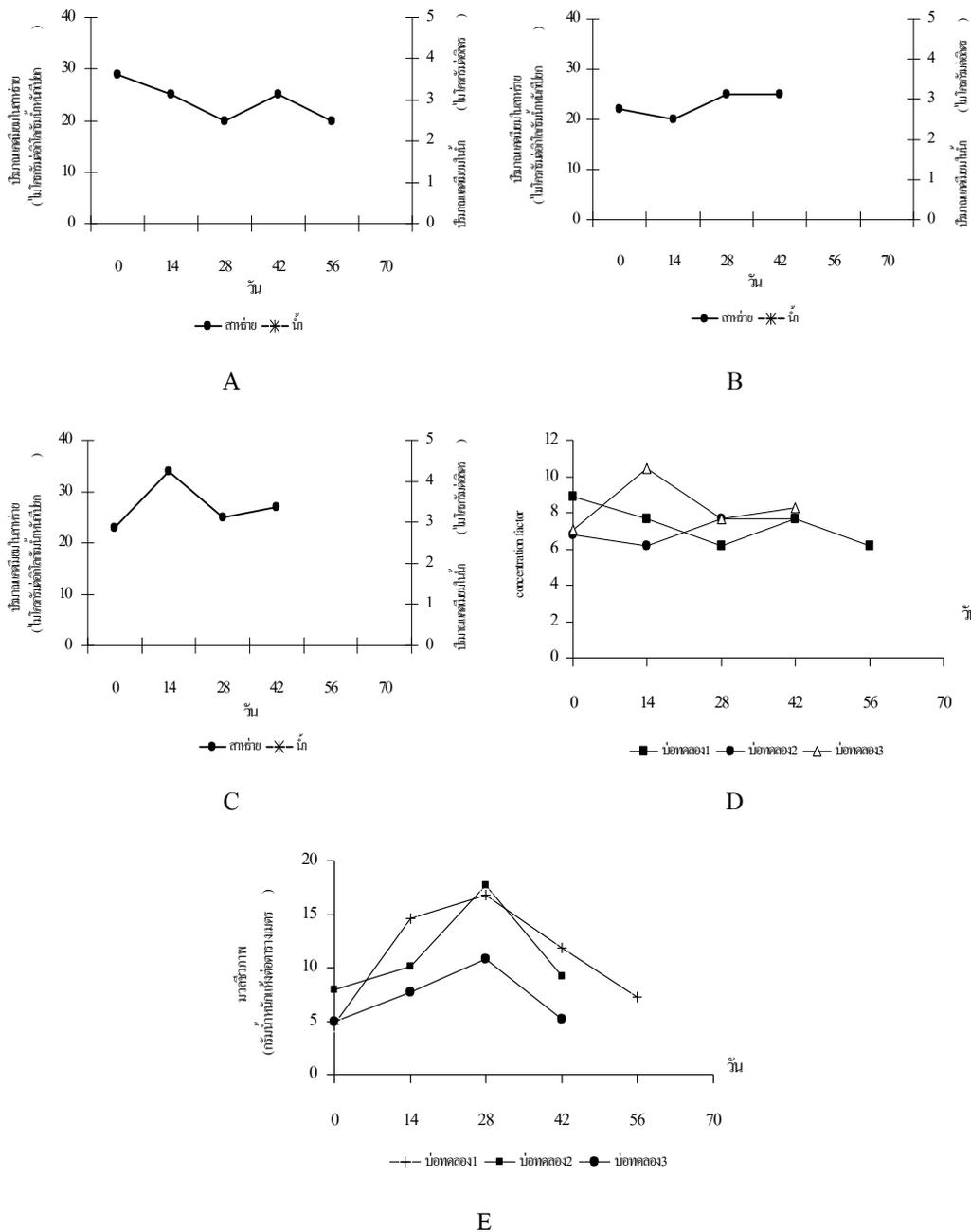
จากการศึกษาครั้งนี้ มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำต่ำกว่า 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ปลอดภัย ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง โดยในช่วงที่มวลชีวภาพของสาหร่ายใต้ออกในบ่อเพิ่มขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง 0.2 เท่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในสาหร่าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.61 ± 1.37 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่า 7.61 ± 1.37 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับดังแสดงในตารางที่ 32 เนื่องจากความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาศึกษา โดยมีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาช่วงที่สาหร่ายใต้ออกมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นใน 28 วันแรก สามารถคำนวณปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายใต้ออกดูดซับได้ในบ่อพื้นที่ทั้งหมด 4 ไร่ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 สาหร่ายใต้ออกสามารถดูดซับแคดเมียมได้เท่ากับ 269.40-716.31 ไมโครกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 สาหร่ายใต้ออกสามารถดูดซับแคดเมียม มีค่าเท่ากับ 341.15-869.07 ไมโครกรัมและในบ่อทดลองที่ 3

สำหรับไส้ไก่สามารถดูดซับแคดเมียมได้มีค่าเท่ากับ 223.94-531.99 ไมโครกรัม ดังแสดงค่าในตารางภาคผนวกที่ 5

ตารางที่ 32 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสำหรับไส้ไก่และค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ

ป๋อทดลอง		
ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ในน้ำ ($\mu\text{g/L}$)	ความเข้มข้นของแคดเมียม ในสำหรับ ($\mu\text{g/kg dry weight}$)	concentration factor
1.00 (0.2 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	7.61 \pm 1.37 (n=9)	7.61 \pm 1.37 (n=9)
>1.00-5.00 (0.2-1 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	-	-
>5.00-25.00 (1-5 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	-	-



ภาพที่ 14 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อทดลอง 1, (B) บ่อทดลอง 2, (C) บ่อทดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับแคดเมียมของบ่อทดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายใส่ไว้ในบ่อทดลอง

2.6 การศึกษาปริมาณสารหนูในดิน น้ำ และสาหร่ายใล้ใก่

2.6.1 ปริมาณสารหนูในดิน

ปริมาณสารหนูในดินของบ่อควบคุมที่ 1 ในวันแรก มีค่าเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 1,362.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13,982.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีค่าลดลงเท่ากับ 10,742.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อควบคุมที่ 2 มีปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดินในวันแรกของการศึกษามีค่าเท่ากับ 3,864.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในวันที่ 28 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 56 โดยมีค่าเท่ากับ 9,911.00 และ 11,178.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในบ่อควบคุมที่ 3 มีปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดินเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 9,950.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12,651.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และลดลงในวันที่ 56 เท่ากับ 10,030.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

ปริมาณสารหนูในดินในบ่อทดลองที่ 1 เริ่มต้นวันแรกเท่ากับ 1,288.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 4,085.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในวันที่ 56 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8,743.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 มีปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดินในวันแรกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 27,105.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าลดลงในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 14,464.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และลดลงต่ำสุดในวันที่ 56 มีค่าเท่ากับ 9,219.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในบ่อทดลองที่ 3 ในวันแรกของการศึกษามีปริมาณสารหนูในดินเริ่มต้นเท่ากับ 14,197.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นปริมาณลดลงมีค่าเท่ากับ 6,541.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในวันที่ 28 และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 56 โดยมีค่าเท่ากับ 7,872.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงค่าในตารางที่ 33

ปริมาณสารหนูในดินของบ่อควบคุมที่ 1 ในวันเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าในบ่อควบคุมที่ 2 และ 3 แต่หลังจากนั้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับบ่อควบคุมที่ 2 ในขณะที่บ่อควบคุมที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย จนเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษา พบว่าในแต่ละบ่อควบคุม มีปริมาณเปลี่ยนแปลงอีกเพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 15A-15C) ส่วนปริมาณสารหนูในดินของบ่อทดลอง พบว่าในบ่อทดลองที่ 1 มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับบ่อทดลองที่ 2 และ 3 หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นไปจนสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษา แต่ในบ่อทดลองที่ 2 และ 3 มีค่าลดลงจากความเข้มข้นเดิมเป็นเท่าตัวใน

ระยะเวลาเพียงเดือนเดียว และหลังจากนั้นในบ่อทดลองที่ 2 จะมีค่าลดลงอีก แต่บ่อทดลองที่ 3 มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย (ภาพที่ 15D-15F)

ตารางที่ 33 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดินของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

วัน	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	1,362.00	3,864.00	9,950.00	1,288.00	27,105.00	14,197.00
14	-	-	-	-	-	-
28	13,982.00	9,911.00	12,651.00	4,085.00	14,464.00	6,541.00
42	-	-	-	-	-	-
56	10,742.00	11,178.00	10,030.00	8,743.00	9,219.00	7,872.00
70	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

2.6.2 ปริมาณสารหนูในน้ำ

ปริมาณสารหนูในน้ำของบ่อควบคุมที่ 1 มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาศึกษา โดยมีค่าเริ่มต้น 14.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และในวันที่ 14 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 15.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่พบสูงสุด หลังจากนั้นมีการลดลงในวันที่ 28 เป็น 13.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 42 เท่ากับ 10.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับวันเริ่มต้นเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ในบ่อควบคุมที่ 2 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำเริ่มต้น มีค่าเฉลี่ย 12.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีการลดลงเล็กน้อย และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 เป็น 16.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 42 เท่ากับ 11.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 15.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 56 ในบ่อควบคุมที่ 3 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำในวันเริ่มต้นมีค่า 16.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14-28 เท่ากับ 17.00

ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมามีค่าลดลงอีกครั้งในวันที่ 42 ซึ่งมีค่าต่ำสุด 13.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และก็มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดอีกครั้งในวันที่ 56

ปริมาณสารหนูในน้ำของบ่อทดลองที่ 1 มีค่าเริ่มต้น 18.00 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมามีค่าลดลงในวันที่ 14 เท่ากับ 15.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 13.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วมีค่าคงที่ไปจนถึงวันที่ 56 และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาในวันที่ 70 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 19.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ในบ่อทดลองที่ 2 พบว่า ปริมาณสารหนูในน้ำในมีค่าเฉลี่ยเริ่มต้นสูงสุด เท่ากับ 22.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นมีค่าลดลงในที 14 เท่ากับ 13.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และลดลงอีกเล็กน้อยในระดับที่คงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา โดยมีค่าลดลงต่ำสุด เท่ากับ 10.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ในบ่อทดลองที่ 3 พบว่า ปริมาณสารหนูในน้ำในมีค่าเริ่มต้นสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 18.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 14 เท่ากับ 12.00 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วค่าจึงค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับในวันที่ 28 42 และ 56 ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการศึกษา สารหนูในน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 18.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังแสดงค่าในตารางที่ 34 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสารหนูในน้ำในแต่ละบ่อควบคุม (ภาพที่ 15A-15C) พบว่า ในบ่อควบคุมที่ 1 และ 3 มีผลไปในทางเดียวกัน คือ ในช่วง 28 วันแรก ปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าสูงและมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง จนลดลงต่ำสุดในวันที่ 42 และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อสิ้นสุดการศึกษา เมื่อพิจารณาปริมาณสารหนูในน้ำของบ่อทดลอง พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 และ 3 มีผลไปในทางเดียวกัน คือ มีค่าลดลงในระยะแรก หลังจากนั้นค่าจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น ไปจนถึงสิ้นสุดการศึกษา ในขณะที่บ่อทดลองที่ 2 ค่าจะลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (ภาพที่ 15D-15F)

2.6.3 ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียว

ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวใน บ่อทดลองที่ 1 ในวันแรกของการศึกษามีค่า 627.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักเปียก และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 มีค่า 1,275.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักเปียก หลังจากนั้นมามีค่าลดลงในวันที่ 28 เท่ากับ 507.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักเปียก และพบว่าปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในวันที่ 42 มีค่าเฉลี่ย 887.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักเปียก และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 56 เท่ากับ 446.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักเปียก (ภาพที่ 16A) ดังแสดงในตารางที่ 35 ในบ่อทดลองที่ 2 ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวเริ่มต้น มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 690.00 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักเปียก

ตารางที่ 34 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง

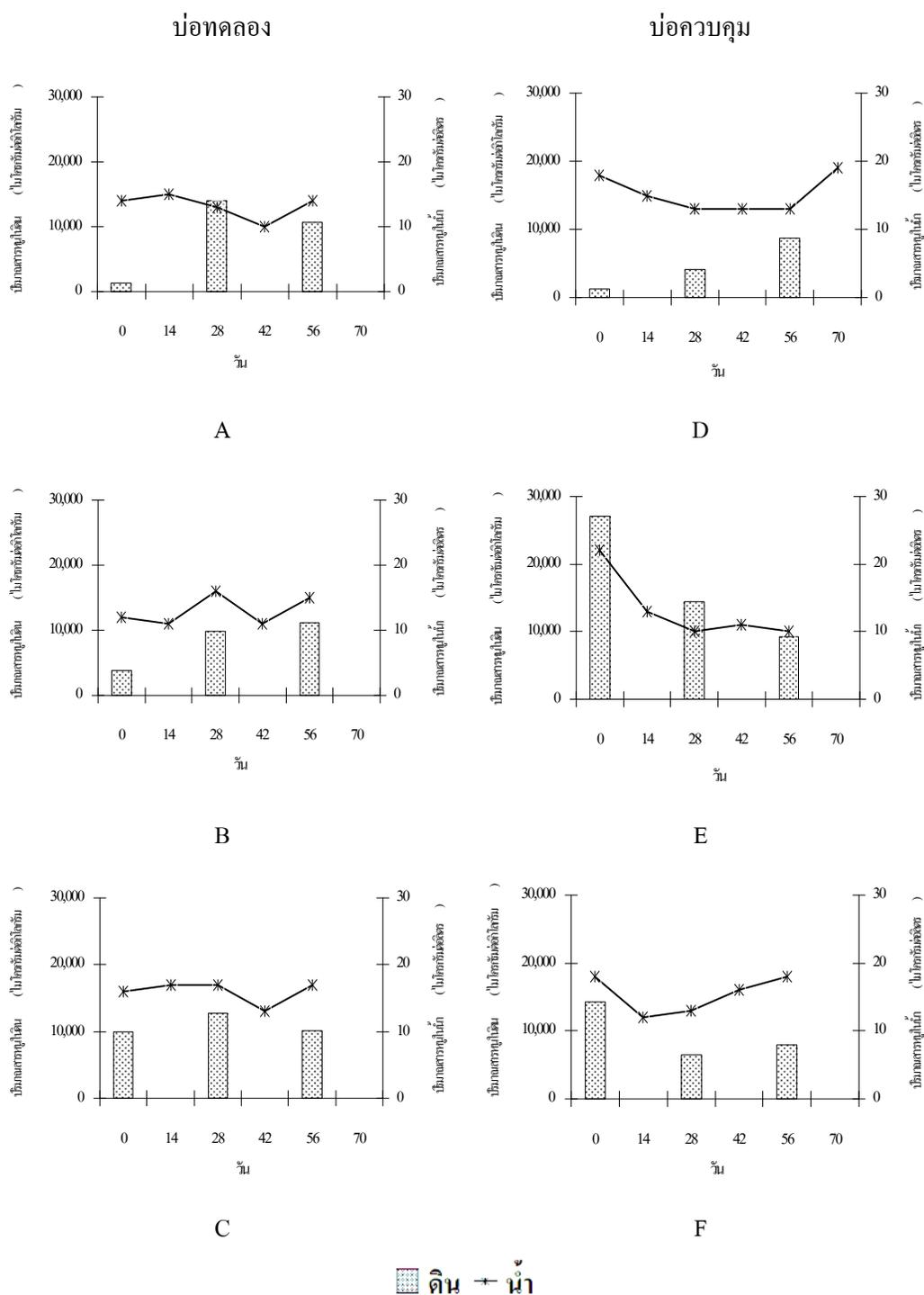
วัน	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)					
	บ่อควบคุม			บ่อทดลอง		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	14.00	12.00	16.00	18.00	22.00	18.00
14	15.00	11.00	17.00	15.00	13.00	12.00
28	13.00	16.00	17.00	13.00	10.00	13.00
42	10.00	11.00	13.00	13.00	11.00	16.00
56	14.00	15.00	17.00	13.00	10.00	18.00
70	-	-	-	19.00	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 35 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวของบ่อทดลอง

วัน	ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)		
	บ่อ 1	บ่อ 2	บ่อ 3
0	627.00	690.00	602.00
14	1,275.00	542.00	3,692.00
28	507.00	8,838.00	nd
42	887.00	793.00	193.00
56	466.00	-	-
70	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้ทำการเก็บ, nd = ไม่สามารถตรวจพบได้ (<145.00)



ภาพที่ 15 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในดิน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณสารหนูเฉลี่ยในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อควบคุม 1, (B) บ่อควบคุม 2, (C) บ่อควบคุม 3, (D) บ่อทดลอง 1, (E) บ่อทดลอง 2, (F) บ่อทดลอง 3

และมีค่าลดลงเล็กน้อยในวันที่ 14 เท่ากับ 542.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าเท่ากับ 8,838.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก แล้วจึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 42 มีค่าเท่ากับ 793.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (ภาพที่ 16B) ในบ่อดทดลองที่ 3 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวในวันแรกของการศึกษา มีค่าเฉลี่ย 602.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก หลังจากนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 โดยมีค่าเท่ากับ 3,692.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก และมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 โดยมีค่าน้อยกว่า 145.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในวันที่ 56 เท่ากับ 193.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (ภาพที่ 16C)

เมื่อนำข้อมูลปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายสีเขียว และปริมาณสารหนูในน้ำ มาคำนวณค่า concentration factor พบว่า ในบ่อดทดลองที่ 1 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 10.69 เท่า และเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 มีค่าเท่ากับ 26.10 เท่า หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลง ในวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 11.97 เท่า และในวันที่ 42 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 20.95 เท่า และมีค่าต่ำสุดในวันที่ 56 เท่ากับ 11.01 เท่า ในบ่อดทดลองที่ 2 มีค่า concentration factor ในวันเริ่มต้นเท่ากับ 9.63 เท่า และมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 มีค่า 12.80 เท่า หลังจากนั้นในวันที่ 28 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 271.33 เท่า และในวันที่ 42 จึงมีค่าลดลง เท่ากับ 22.13 เท่า และค่า concentration factor ในบ่อดทดลองที่ 3 พบว่า มีค่าในวันแรกเท่ากับ 10.27 เท่า หลังจากนั้นก็มีค่าสูงสุดในวันที่ 14 โดยมีค่าเท่ากับ 94.45 เท่า และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 เท่ากับ 3.42 เท่า และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.70 เท่า ในวันที่ 42 (ตารางที่ 36; ภาพที่ 16D)

เมื่อพิจารณามวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวร่วมกับปริมาณสารหนูในดินและในน้ำ พบว่า ในบ่อดทดลองที่ 1 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวเพิ่มขึ้นในวันที่ 14 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 ซึ่งพบว่า ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุดในวันที่ 14 เท่ากับ 391.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าลดลงต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้ค่า concentration factor ในการดูดซับสารหนูของสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 26.10 เท่า และในวันที่ 28 ก็พบว่าปริมาณสารหนูในดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารหนูในน้ำเกิดการตกตะกอนไปสะสมในดิน ตะกอนพื้นบ่อ ทำให้พบปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวมีค่าต่ำ แม้ว่าค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพสูงสุดในวันที่ 28 และปริมาณสารหนูในน้ำก็มีค่าลดลงต่ำสุด ส่งผลให้ค่า concentration factor มีค่าลดลงไปด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 11.97 เท่า หลังจากนั้นเมื่อ มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อดทดลอง ปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายสีเขียวก็มีค่าลดลงด้วย ทำให้ ค่า concentration factor ลดลง แต่ยังคงพบว่าการสะสมของสารหนูในดินสูงขึ้น

ในบ่อทดลองที่ 2 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลองที่ 28 เท่ากับ 17.68 ± 4.80 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งในช่วงที่สาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลองมีมวลชีวภาพสูงสุด พบว่า ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลองที่ 28 โดยมีความเท่ากับ 2,713.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง และปริมาณสารหนูในน้ำก็มีค่าลดลงต่ำสุดด้วย ทำให้ค่า concentration factor ในการดูดซับสารหนูของสาหร่ายมีค่าสูงสุด โดยมีความเท่ากับ 271.33 เท่า และพบว่าสารหนูในดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 28 ซึ่งอาจเกิดจากการสะสมของสารหนูในดิน จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ในน้ำมีค่าลดลงต่ำสุด หลังจากนั้นในวันที่ 42 เมื่อสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลอง ปริมาณสารหนูที่พบในสาหร่ายสีเขียวแกมมาก็มีค่าลดลงเช่นกัน จึงทำให้มีค่า concentration factor ลดลงด้วย และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาศาหร่ายในน้ำก็มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

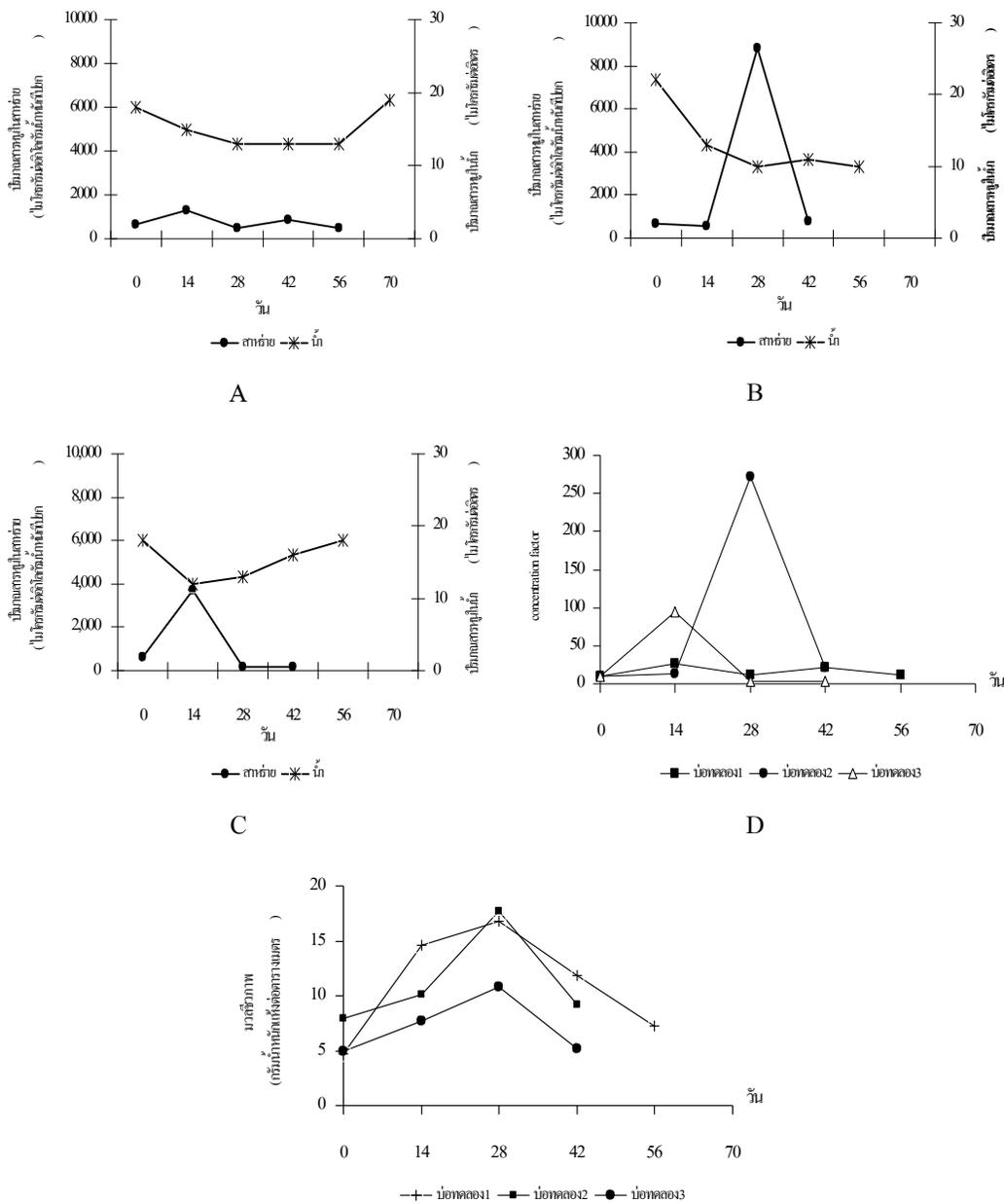
ในบ่อทดลองที่ 3 ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลองที่ 14 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 28 ซึ่งพบว่า ในช่วงที่มีการเพิ่มของมวลชีวภาพในบ่อ ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาเพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 1,133.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง และปริมาณสารหนูในน้ำก็มีค่าลดลงต่ำสุด จึงทำให้ค่า concentration factor มีค่าสูงสุด โดยมีความเท่ากับ 94.45 เท่า ซึ่งในวันที่ 28 แม้ว่าจะเป็นช่วงที่สาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลองมีมวลชีวภาพสูงสุด แต่พบว่าปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาลดลงต่ำสุด ขณะเดียวกันปริมาณสารหนูในดินก็มีค่าลดลงด้วย ทำให้ค่า concentration factor มีค่าต่ำสุด

ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลองที่ 1 เท่ากับ 143.00-391.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 2 มีค่าอยู่ที่ 166.00-2,713.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ในบ่อทดลองที่ 3 มีค่าเท่ากับ 45.00-1,133.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ซึ่งในบ่อทดลองที่ 1 มีปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาต่ำสุด และบ่อทดลองที่ 2 มีค่าสูงสุด จากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Besada *et al.* (2009) พบว่า ในสาหร่าย *Ulva rigida* มีปริมาณสารหนูเท่ากับ 6,410.00-7,060.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาของบ่อทดลอง ที่แม้ว่าจะมีค่าต่ำกว่า แต่เมื่อคิดเทียบกับหน่วยพื้นที่แล้วปริมาณที่พบในบ่อทดลองนับว่ามีค่าสูง และจากการศึกษาของปีทมา และคณะ (2550) ก็พบว่าปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวแกมมาในบ่อทดลอง มีค่าเท่ากับ 5,000.00-5,180.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง ซึ่งในสาหร่ายกลุ่มสีเขียวแกมมาและสีน้ำตาลก็พบมีค่าสูงเช่นกัน โดยมีความเฉลี่ยรวมเท่ากับ 180.00-22,900.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง และสาหร่ายสีน้ำตาลมีการสะสมสารหนูสูงกว่าในสาหร่ายสีแกมมา

ตารางที่ 36 ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวใต้น้ำ และ concentration factor ในการดูดซับสารหนูของบ่อดลอง

วันที่	บ่อดลอง								
	บ่อ 1			บ่อ 2			บ่อ 3		
	ปริมาณ สารหนู ในสาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ สารหนู ในสาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor	ปริมาณ สารหนู ในสาหร่าย (µg/kg dry weight)	น้ำ (µg/L)	concentration factor
0	192.00	18.00	10.69	212.00	22.00	9.63	185.00	18.00	10.27
14	391.00	15.00	26.10	166.00	13.00	12.80	1,133.00	12.00	94.45
28	156.00	13.00	11.97	2,713.00	10.00	271.33	45.00	13.00	3.42
42	272.00	13.00	20.95	243.00	11.00	22.13	59.00	16.00	3.70
56	143.00	13.00	11.01	-	10.00	-	-	18.00	-
70	-	19.00	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้ทำการเก็บ



C

ภาพที่ 16 ปริมาณสารหนูเจือปนในสาหร่าย (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) และปริมาณสารหนูเจือปนในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร): (A) บ่อดลอง 1, (B) บ่อดลอง 2, (C) บ่อดลอง 3, (D) concentration factor ในการดูดซับสารหนูของบ่อดลอง และ (E) ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของสาหร่ายใส่ไว้ในบ่อดลอง

จากการศึกษาครั้งนี้ ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูต่ำกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ปลอดภัย ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง พบว่า ในช่วงที่มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียวในบ่อเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารหนูในสาหร่ายมีค่าเท่ากับ $2,713.00 \pm 0.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่า 271.33 ± 0.00 เท่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเพิ่มสูงขึ้น พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในสาหร่ายมีค่าลดลง ทำให้มีค่า concentration factor ลดลงด้วย โดยที่ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำสูงกว่าระดับมาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง 2 เท่า มีค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของสารหนูในสาหร่ายเท่ากับ 911.88 ± 622.63 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และ concentration factor มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 92.15 ± 55.13 เท่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำมีค่าสูงขึ้นมากกว่าระดับมาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง 2-4 เท่า ความเข้มข้นของสารหนูในสาหร่ายสีเขียว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 212.00 ± 0.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และค่าเฉลี่ย concentration factor มีค่าลดลงเท่ากับ 9.63 ± 0.00 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 37

ตารางที่ 37 ปริมาณสารหนูเฉลี่ยในสาหร่ายสีเขียวและค่าเฉลี่ย concentration factor ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำ

บ่อทดลอง		
ระดับความเข้มข้นของสารหนู ในน้ำ ($\mu\text{g/L}$)	ความเข้มข้นของสารหนู ใน สาหร่าย ($\mu\text{g/kg dry weight}$)	concentration factor
10.00 (ค่ามาตรฐานน้ำทะเลชายฝั่ง)	$2,713.00 \pm 0.00$ (n=3)	271.33 ± 0.00 (n=3)
>10.00-20.00 (1-2 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	911.88 ± 622.63 (n=3)	92.15 ± 55.13 (n=3)
>20.00-40.00 (2-4 เท่าของค่ามาตรฐาน น้ำทะเลชายฝั่ง)	212.00 ± 0.00 (n=3)	9.63 ± 0.00 (n=3)

ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำสูงขึ้น 1-2 เท่า ของค่ามาตรฐานน้ำทะเล ชายฝั่ง พบว่า ค่า concentration factor ลดลงตามระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น เนื่องจากในช่วงที่สาหร่ายไส้ไก่มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น จำนวนสาหร่ายในบ่อมีมากขึ้น รวมทั้งสารหนูบางส่วนเกิดการตกตะกอนสะสมในดิน ทำให้ปริมาณสารหนูที่สาหร่ายดูดซับได้ต่อหน่วยหรือแต่ละทัลล์มี ปริมาณลดลงตามจำนวนสาหร่ายที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นในน้ำสูงขึ้น ค่า concentration factor จึงลดลง

เมื่อพิจารณาช่วงที่สาหร่ายไส้ไก่มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นใน 28 วันแรก สามารถคำนวณ ปริมาณสารหนูที่สาหร่ายไส้ไก่ดูดซับได้ในบ่อพื้นที่ทั้งหมด 4 ไร่ พบว่า ในบ่อทดลองที่ 1 สาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับสารหนู มีค่าเท่ากับ 5.81-36.47 มิลลิกรัม ในบ่อทดลองที่ 2 สาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับสารหนู โดยมีค่าเท่ากับ 10.69-307.00 มิลลิกรัม และในบ่อทดลองที่ 3 สาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับสารหนูได้มีค่าเท่ากับ 3.12-55.58 มิลลิกรัม ดังแสดงค่าในตารางภาคผนวกที่ 6

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและสารหนู ของสาหร่ายไส้ไก่ใน ห้องปฏิบัติการ พบว่า สาหร่ายไส้ไก่ในชุดทดลองทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียม สามารถดูดซับ แคดเมียมที่ละลายในน้ำได้ดีในช่วงสองวันแรก หลังจากนั้นปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายมีค่าคงที่ โดย ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำก็มีค่าลดลงในวันที่ 2 จนกระทั่งมีปริมาณเหลือน้อยจนไม่สามารถ วิเคราะห์ต่อได้ในวันที่ 6 ส่วน โหลชุดที่ไม่มีสาหร่ายไส้ไก่ ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ทุกระดับความเข้มข้น ซึ่งจากการศึกษาในบ่อ พบว่า ปริมาณแคดเมียมในน้ำมีผล ไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากถูกสาหร่ายไส้ไก่ดูดซับจนมีค่าลดลง ต่ำสุด มีค่าน้อยกว่า 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่สามารถตรวจพบได้ในห้องปฏิบัติการ ตลอด ระยะเวลาที่ศึกษา ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อทดลองก็มีค่าสูงตั้งแต่วันที่ ทำการศึกษา เมื่อปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลงจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ ปริมาณแคดเมียมใน สาหร่ายไส้ไอก็มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อคำนวณค่า concentration factor ของสาหร่ายไส้ไก่ในการดูดซับแคดเมียม ในห้องปฏิบัติการ พบว่า สาหร่ายไส้ ไ่สามารถดูดซับปริมาณแคดเมียมได้มากกว่าปริมาณแคดเมียมที่มีในน้ำ 7.3-446 เท่า และในบ่อ ทดลองก็พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 6.14-7.66 เท่า ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พบใน สาหร่ายมักมีปริมาณสูงกว่าที่พบในน้ำมาก (Kamala-Kannan *et al.*, 2008) ในธรรมชาติปริมาณ แคดเมียมที่พบในสาหร่าย มีค่าตั้งแต่ 270.00-3,200.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่า สูงกว่าในน้ำทะเลประมาณ 10-100 เท่า (Muller *et al.*, 1993, Almela *et al.*, 2006) ซึ่งในบ่อทดลอง

ยังพบว่ามีค่าน้อยกว่าที่พบในธรรมชาติทั่วไป ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 10.40 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และปริมาณที่พบในการศึกษาในห้องปฏิบัติการครั้งนี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 446.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่เกินค่าที่ตรวจพบในธรรมชาติ

สาหร่ายสีเขียวสามารถดูดซับสารหนูได้ดีในช่วงสองวันแรก หลังจากนั้นการดูดซับ จะลดลง โดยสามารถดูดซับได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ $2,255.94 \pm 31.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งปริมาณสารหนูในน้ำในช่วงสองวันแรกในแต่ละความเข้มข้นก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และในวันที่ 6 เมื่อสาหร่ายสีเขียวไม่มีปริมาณสารหนูลดลง หรือไม่สามารที่จะดูดซับสารหนูที่ละลายในน้ำได้อีกปริมาณสารหนูในน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในโหลชุดที่ไม่มีสาหร่ายสีเขียว พบว่า เมื่อครบระยะเวลาในการทำการศึกษา ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำมีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน ปริมาณสารหนูในน้ำลดลงจากค่าความเข้มข้นเดิมในทุกชุด ความเข้มข้น ซึ่งปริมาณสารหนูในน้ำจากการศึกษาในบ่อทดลองก็พบว่า มีค่าลดลงจากความเข้มข้นเดิมเช่นกัน ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อาจเกิดจากปฏิกิริยาการตกตะกอนของสารหนูในน้ำที่เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปไอออน ไปรวมตัวกับไอออนของแร่ธาตุต่างๆในน้ำ เช่น เหล็กไอออน (Fe^{3+}) ทำให้ตกตะกอนลงสู่พื้น (Mambote *et al.*, 2002) นอกจากนี้ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) ก็มีผลต่อการตกตะกอนของสารหนู ที่ pH มากกว่า 8 จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น (De Vitre' *et al.*, 1991) โดยในการศึกษานี้ น้ำทะเลเทียมที่ใช้และน้ำในบ่อทดลองมี pH สูงกว่า 8 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุร่วมที่ทำให้สารหนูตกตะกอน ในขณะที่ปริมาณสารหนู ในสาหร่ายสีเขียวของบ่อทดลอง มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 14 และ 28 วันแรก ทำให้ concentration factor มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณสารหนูในสาหร่ายสีเขียวเพิ่มขึ้นสูงสุดใน 28 วันแรก แล้วหลังจากนั้นก็มีการลดลง โดย concentration factor ในบ่อทดลองมีค่า 3.42-271.32 เท่า ส่วนการศึกษาในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากปริมาณสารหนูในน้ำของโหลชุดควบคุมมีค่าลดลงจากการตกตะกอนของสารหนู ความเข้มข้นในน้ำไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่า concentration factor ได้ จึงคำนวณหาการสะสมตัวและอัตราการสะสมตัวของสารหนูในสาหร่ายสีเขียวในแต่ละระยะเวลา โดยพบว่า สารหนูในสาหร่ายสีเขียวมีค่าสูงในช่วง 2 วันแรก และการสะสมตัวของสารหนูในสาหร่ายสีเขียวจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำสูงขึ้น โดยมีการสะสมสารหนูสูงสุดที่ระยะเวลาผ่านไป 2 วัน ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เท่ากับ $1,542.49 \pm 87.58$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และอัตราการสะสมสารหนูก็เพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อระยะเวลาผ่านไปครบ 6 วัน มีการสะสมตัวเพิ่มขึ้น แต่ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร การสะสมตัวลดลงต่ำกว่าระยะเวลา 2 วัน แต่อัตราการสะสมตัวของสารหนูในระยะเวลา 6 วัน มีค่าต่ำกว่าใน

ระยะเวลา 2 วัน ซึ่งเกิดจากการที่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินดูดซับสารหนูได้ลดลง เพราะสารหนูบางส่วนตกตะกอนก่อนที่สาหร่ายจะดูดซับได้ ทำให้เมื่อระยะเวลาผ่านไปอีก 4 วัน จึงพบปริมาณสารหนูเพิ่มขึ้นในเนื้อสาหร่ายอีกเล็กน้อย ทำให้อัตราการสะสมตัวของสารหนูลดลงกว่าในระยะเวลา 2 วัน

เมื่อพิจารณาค่า concentration factor ในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบว่า มีค่า concentration factor ในการดูดซับโลหะหนักเรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ตะกั่ว > สังกะสี > สารหนู > แคดเมียม > โปรท โดย concentration factor ในการดูดซับตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 10.32-834.73 เท่า ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่มีปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมากกว่าปริมาณตะกั่วในน้ำ 10.32-834.73 เท่า ค่า concentration factor ในการดูดซับสังกะสี มีค่าเท่ากับ 19.19-627.82 เท่า ค่า concentration factor ในการดูดซับสารหนู มีค่าเท่ากับ 3.42-271.33 เท่า ค่า concentration factor ในการดูดซับแคดเมียม มีค่าเท่ากับ 6.14-10.44 เท่า และค่า concentration factor ในการดูดซับโปรท มีค่าเท่ากับ 2.30-10.44 เท่า ซึ่งเมื่อพิจารณา ค่า concentration factor ของโลหะหนักทุกตัวจากการศึกษาในครั้งนี้ ก็ยังพบว่า มีค่าต่ำกว่าในธรรมชาติ โดยจากการศึกษาของ Kamala-Kannan *et al.* (2008) พบว่า สาหร่าย *U. lactuca* มีค่า concentration factor ในการดูดซับตะกั่ว เท่ากับ 3.99×10^3 เท่า และแคดเมียมมีค่า concentration factor เท่ากับ 6.68×10^4 เท่า เนื่องจากปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในสาหร่าย *U. lactuca* (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) มีค่าสูงกว่าปริมาณที่มีในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร) มาก เมื่อคำนวณปริมาณตะกั่วในน้ำให้มีหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณที่มีในน้ำจึงมีค่าลดลงไปอีก จึงส่งผลมีค่า concentration factor สูงถึง 10^3 - 10^4 เท่า และจากการศึกษาของ Leal *et al.* (1997) ก็พบว่า ในสาหร่าย *Enteromorpha* spp. มีค่า concentration factor ของแคดเมียมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.5×10^2 เท่า โปรทมีค่าเท่ากับ 3.6×10^2 เท่า และ ตะกั่วมีค่าเท่ากับ 1.9×10^3 เท่า และในสาหร่ายกลุ่มอื่น ก็มีค่า concentration factor สูงเช่นเดียวกัน การดูดซับสังกะสีของสาหร่ายสีน้ำตาล *Fucus vesiculosus* และ *Ascophyllum nodosum* มีค่าสูงกว่าในน้ำ เท่ากับ 10×10^3 เท่า และ 13×10^3 เท่า ตามลำดับ (Foster, 1976) เมื่อพิจารณาค่า concentration factor ของตะกั่วในบ่อทดลอง พบว่า มีการสะสมของปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสูงสุด และปริมาณตะกั่วในน้ำก็มีค่าต่ำจนไม่สามารถตรวจพบได้ จึงทำให้มีค่า concentration factor สูงสุด ซึ่งในสังกะสี และสารหนูก็มีผลในทำนองเดียวกัน ส่วนค่าแคดเมียมและโปรทที่มีค่า concentration factor ต่ำ เกิดจากการที่ปริมาณแคดเมียมและโปรทที่พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีค่าต่ำ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากตลอดระยะเวลาการศึกษา แม้ว่าปริมาณที่พบในน้ำจะมีค่าต่ำตลอดก็ตาม แต่ก็ไม่ได้ทำให้ concentration factor มีค่าเพิ่มขึ้นมากนัก

ละลายน้ำ ถูกดูดซับโดยสารแขวนลอยในน้ำ ทำให้มีบางส่วนตกตะกอนลงสู่พื้นบ่อ (สุวรรณี, 2546) ทำให้ตรวจพบในน้ำน้อยมาก ซึ่งส่วนที่เหลือถูกดูดซับโดยสารรายไส้ไก่ ส่วนที่ตกตะกอนก็มีการสะสมตัวในดินทำให้มีค่าสูงขึ้น และการได้รับน้ำจากฝนที่ชะล้างแร่ธาตุหน้าดินลงไปบ่อ ซึ่งในช่วงที่ศึกษา พื้นที่ศึกษามีฝนตกในช่วงก่อนสิ้นสุดการศึกษา ทำให้ปริมาณตะกั่วมีการหมุนเวียนในบ่อ จึงพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงและมีการสะสมตัวในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงที่มีการหมุนเวียนของตะกั่วในบ่อ สารรายไส้ไก่จึงสามารถดูดซับตะกั่วได้เพิ่มขึ้น จนไม่สามารถตรวจพบได้ ในน้ำ

การดูดซับสังกะสีของสารรายไส้ไก่ มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันไปทั้งระบบ โดยพบว่า สารรายไส้ไก่สามารถช่วยลดปริมาณสังกะสีในดินและในน้ำได้ดี โดยความเข้มข้นของสังกะสีในดินมีค่าลดลงเมื่อสิ้นสุดการศึกษา ในขณะที่ปริมาณสังกะสีในดินของบ่อควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และปริมาณสังกะสีในสารรายไส้ไก่ก็มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสังกะสีในดินมีค่าสูง ในสารรายไส้ไก่ก็มีค่าลดลง ซึ่งปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ สังกะสีมีความสามารถละลายในน้ำได้น้อย เมื่อถูกดูดซับโดยอนุภาคสารแขวนลอยจะตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำ ทำให้พบความเข้มข้นสูงในดิน ซึ่งตามปกติแหล่งน้ำผิวดินมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนในน้ำทะเลมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (McNeely *et al.*, 1979)

ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของสารรายไส้ไก่ เนื่องจาก พบว่า ปริมาณแคดเมียมในน้ำไม่สามารถตรวจพบได้ตลอดระยะเวลาการศึกษา และปริมาณแคดเมียมในดินมีค่าสูงขึ้นและลดลงไม่ชัดเจน อีกทั้งปริมาณแคดเมียมที่พบในสารรายไส้ไก่ในวันแรกมีค่าเฉลี่ยโดยรวมสูง และมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงเพิ่มขึ้นสลับกันไป จึงพบว่ามีค่า concentration factor ต่ำ

การดูดซับสารหนูของสารรายไส้ไก่ กับปริมาณสารหนูในดินของบ่อทดลองมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันไม่ชัดเจน แต่มีในบางช่วงที่เมื่อปริมาณสารหนูในสารรายไส้ไก่มีค่าเพิ่มขึ้น แล้วปริมาณสารหนูในดินมีค่าลดลง แต่พบเป็นส่วนน้อย ส่วนปริมาณสารหนูในดินของบ่อทดลองโดยรวมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่ในขณะที่ปริมาณสารหนูในน้ำมีความเข้มข้นลดลง ก็พบว่าในสารรายไส้ไก่มีปริมาณสารหนูสูงขึ้น ซึ่งปริมาณสารหนูที่พบในสารรายไส้ไก่มีค่าสูง ในขณะที่ปริมาณในน้ำต่ำจึงมีค่า concentration factor สูง

นอกจากนี้ในระบบการเลี้ยงกุ้งในพื้นที่ทำการศึกษานี้ใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด น้ำในระบบการเลี้ยงทั้งหมดหมุนเวียนกลับมาใช้ตลอดระยะเวลาการเลี้ยง จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้

ปริมาณโลหะหนักในน้ำและในดินเกิดกระบวนการสะสมหมุนเวียนอยู่ในระบบ ซึ่งอาจส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาได้

การศึกษาคุณสมบัติของน้ำ

คุณสมบัติของน้ำในบ่อควบคุมและบ่อทดลอง ตลอดระยะเวลาการศึกษา ได้แก่

บ่อควบคุม

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าอยู่ระหว่าง 7.95-9.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 8.6 ± 0.65 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 8.68-8.72 และมีค่าเฉลี่ย 8.7 ± 0.02 อุณหภูมิของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 29.51-30.09 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ย 29.8 ± 0.29 องศาเซลเซียส ความเค็มของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 13.69-15.31 psu และมีค่าเฉลี่ย 14.5 ± 0.81 psu ค่าการนำไฟฟ้าของบ่อควบคุมมีค่าอยู่ระหว่าง 23.17-25.21 มิลลิซิเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 24.19 ± 1.02 มิลลิซิเมนส์ต่อเซนติเมตร ความกระด้างของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 3516.27-3906.53 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 3711.40 ± 195.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 181.07-260.65 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 220.86 ± 39.79 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.401-1.621 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 1.011 ± 0.61 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนไตรท์มีค่า 1.161-1.755 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 1.458 ± 0.297 มิลลิกรัมต่อลิตร

บ่อทดลอง

บ่อทดลองที่มีสาหร่ายสีเขียวปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าอยู่ระหว่าง 8.61-12.19 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 10.4 ± 1.79 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 8.49-8.71 และมีค่าเฉลี่ย 8.6 ± 0.11 อุณหภูมิของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 29.16-30.24 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ย 29.7 ± 0.54 องศาเซลเซียส ความเค็มของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 8.99-13.81 psu และมีค่าเฉลี่ย 11.4 ± 2.41 psu ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 15.23-22.71 มิลลิซิเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 18.97 ± 3.74 มิลลิซิเมนส์ต่อเซนติเมตร ความกระด้างของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 2100.36-3553.88 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 2827.12 ± 726.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 165.14-245.32 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 205.23 ± 40.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ

แอมโมเนียรวมในน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.195-1.035 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 0.615 ± 0.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนไตรท์มีค่า 1.005-1.797 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 1.401 ± 0.396 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงค่าในตารางที่ 38

ตารางที่ 38 คุณสมบัติของน้ำในบ่อควบคุมและบ่อทดลองที่มีสาหร่ายสีเขียว

คุณสมบัติของน้ำ	ค่าเฉลี่ย	
	บ่อควบคุม	บ่อทดลอง
ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8.6 ± 0.65	10.4 ± 1.79
pH	8.7 ± 0.02	8.6 ± 0.11
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.8 ± 0.29	29.7 ± 0.54
ความเค็ม (พีพีที)	14.5 ± 0.81	11.4 ± 2.41
ความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	24.19 ± 1.02	18.97 ± 3.74
ความกระด้าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3711.40 ± 195.13	2827.12 ± 726.76
ความเป็นด่างรวม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	220.86 ± 39.79	205.23 ± 40.09
แอมโมเนียรวม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.011 ± 0.61	0.615 ± 0.42
ไนไตรท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.458 ± 0.297	1.401 ± 0.396

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายใ้ใ้ในห้องปฏิบัติการ

สาหร่ายใ้ใ้สามารถดูดซับแคดเมียมได้ดี เมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในน้ำเพิ่มขึ้น สาหร่ายใ้ใ้ก็จะสามารถดูดซับแคดเมียมได้มากขึ้น โดยสาหร่ายใ้ใ้สามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 446.00 ± 28.00 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยสาหร่ายใ้ใ้สามารถดูดซับปริมาณแคดเมียมได้มากกว่าปริมาณแคดเมียมที่มีในน้ำ $7.30-446.00$ เท่า

สาหร่ายใ้ใ้สามารถดูดซับสารหนูได้ดีในช่วงสองวันแรก หลังจากนั้นการดูดซับสารหนูจะลดลง โดยสามารถดูดซับสารหนูได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ $2,255.94 \pm 31.00$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยมีอัตราการสะสมสารหนูสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารหนู 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เท่ากับ 771.25 ± 43.79 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อวัน

2. การศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายใ้ใ้ในระบบการเลี้ยงกุ้ง

ปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายใ้ใ้มีค่าสูงสุดในช่วงที่สาหร่ายในบ่อมีมวลชีวภาพสูงสุด คือ 14-28 วัน โดยสาหร่ายใ้ใ้สามารถดูดซับสังกะสีได้สูงสุด รองลงมาได้แก่ สารหนู, ตะกั่ว, แคดเมียม และปรอท มีค่าเท่ากับ $307.00-3,767.0$, $45.00-2,713.00$, $36.84-834.73$, $6.14-10.44$ และ $3.07-10.44$ ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งในดินตะกอน พบว่ามีการสะสมของสังกะสีสูงสุดเช่นเดียวกับในสาหร่ายใ้ใ้ รองลงมาได้แก่ ตะกั่ว, สารหนู, ปรอท และแคดเมียม ในน้ำ พบว่า มีปริมาณสารหนูและปรอทสูงสุด ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง

เมื่อพิจารณาค่า concentration factor ในการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายใ้ใ้ในบ่อ พบว่า สาหร่ายใ้ใ้มีค่า concentration factor ในการดูดซับตะกั่วได้สูงสุด รองลงมาได้แก่สังกะสี, สารหนู, แคดเมียม และปรอท โดยมีค่าเท่ากับ $22.18-834.73$, $19.19-627.82$, $3.42-271.33$, $6.14-10.44$ และ $2.30-10.44$ เท่า ตามลำดับ

สาหร่ายไส้ไก่สามารถดูดซับโลหะหนักในน้ำ โดยเฉพาะสังกะสี, สารหนู และตะกั่ว ได้ดี ส่วนแคดเมียมและปรอท เนื่องจากในธรรมชาติพบมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ปริมาณที่สาหร่ายดูดซับได้ จึงมีค่าต่ำ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสาหร่ายไส้ไก่กับปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนและในน้ำ ไม่สามารถกล่าวอย่างชัดเจนได้ว่า สาหร่ายไส้ไก่สามารถลดความเข้มข้นของ โลหะหนักในดินตะกอนได้ เนื่องจากในธรรมชาติระหว่างชั้นของดินกับน้ำมีการแลกเปลี่ยนไอออนกันอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้ไม่อาจสรุปได้ว่า ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนที่ลดลง เกิดจากการดูดซับของสาหร่ายเพียงอย่างเดียว

ข้อเสนอแนะ

การนำสาหร่ายไส้ไก่ไปช่วยลดปริมาณโลหะหนักในระบบ การเลี้ยงกุ้ง ในช่วงที่สาหร่ายมีมวลชีวภาพลดลง ซึ่งอาจสังเกตได้จากปริมาณสาหร่ายไส้ไก่ในบ่อที่ลดจำนวนลง ในช่วงนี้ควรมีการเฝ้าระวังและควรนำสาหร่ายออกจากบ่อก่อนที่สาหร่ายจะเน่าและสลายหมดไป เนื่องจากสาหร่ายที่เน่าเหล่านี้ อาจปลดปล่อยโลหะหนักที่สะสมไว้ในเซลล์ออกมา จนอาจทำให้มีโลหะหนักไปสะสมในบ่ออีกครั้ง ซึ่ง อาจจะส่งผลให้มีการสะสมในตัวกุ้งได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กมลพรรณ ไชยทอง, ชัชรี แก้วสุรลิขิต, ปัทมา ระตะนะอาพร, ชลอ ลี้มสุวรรณ และนิติ ชูเชิด.
2552. การศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในการดูดซับโลหะหนัก. น. 89-97. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 47, 17-20 มีนาคม 2552.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2549. โครงการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเล รายงานการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งทั่วประเทศ (รายงานหลัก). กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กองตรวจสอบและรับรองมาตรฐานสินค้าและผลิตภัณฑ์ สัตว์น้ำ. 2552. **Action level** สำหรับการตรวจสอบสารตกค้างที่ห้ามตรวจพบ. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กองสิ่งแวดล้อมประมง. 2537. การสำรวจปริมาณสารพิษและโลหะหนักในแม่ำนครนายก. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กฤษณา ชูติมา. 2520. สารหนู. สารานุกรมไทยฉบับราชบัณฑิตยสถาน เล่มที่ 27 (2520): 17605-17609.
- กาญจนภาชน์ ลีวมโนมนต์. 2527. สาหร่าย. คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จริยาวดี สุริยพันธุ์, ชัชรี แก้วสุรลิขิต, ชนัดดา เกตุมา, ชลอ ลี้มสุวรรณ, นิติ ชูเชิด, สาธิต ประเสริฐศรี, เดชานาท ทองพิทักษ์ และประยูร หงส์รัตน์. 2551. ผลของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ต่อสัตว์หน้าดินในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon* Fabricius). น. 210-219. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 46, 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551.
- จิระ จตุรานนท์. 2526. การกระจายตามแนวตั้งของโลหะหนักบางชนิดในดินตะกอนจากอ่าวไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จารุวรรณ สมศิริ และ ทองสา ราชเดช. 2538. คุณภาพน้ำและโลหะหนักตกค้างในดินตะกอนและในสัตว์น้ำบางชนิดจากแม่น้ำเจ้าพระยา. สถาบันวิจัยประมงน้ำจืด. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ. 28 น.

ชนิดดา เกตุมา. 2551. ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon* Fabricius) และในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชนิดดา เกตุมา, ชัชรี แก้วสุรลิขิต, จริยวดี สุริยพันธุ์, ชลอ ลิมสุวรรณ, นิตติ ชูเชิด, สาธิต ประเสริฐศรี, เดชานาท ทองพิทักษ์ และประยูร หงส์รัตน์. 2551. ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) ในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. น. 200-209. ใน การประชุมทางของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิชาการครั้งที่ 46, 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551.

ชลอ ลิมสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกุล. 2547. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

_____, ชัชรี แก้วสุรลิขิต, นิตติ ชูเชิด, ประยูร หงส์รัตน์ และ เดชา บรรลือเดช. 2551. การเลี้ยงกุ้งร่วมกับสาหร่ายไส้ไก่. เอกสารเผยแพร่สำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง ปี 2551. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 15 น.

ณัฐรัตน์ ปภาวสิทธิ์ และ เขียวลักษณ์ อัมพรรัตน์. 2529. รายงานการวิจัยและวิเคราะห์สถานภาพและศักยภาพการผลิต และการใช้สาหร่ายทะเล รวมทั้งความต้องการในงานวิจัย และพัฒนาในประเทศไทย. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.

นิสราภรณ์ กักดีพันธ์ และจิรวรรณ เพ็ชรสุทธิ. 2550. การเจริญเติบโตของสาหร่ายพวงองุ่น (*Caulerpa lentilifera* J. Agardh) โดยใช้น้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยรามคำแหง 10 (2): 31-45.

- ประยูร หงส์รัตน์, ชลอ ลิมสุวรรณ, นิตี ชูเชิด และ ชัยศรี แก้วสุรลิขิต. 2549. การเลี้ยงกุ้งกุลาดำร่วมกับสาหร่ายไส้ไก่. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ. 15 น.
- ปัทมา ระตะนะอาพร, นงนุช รักสกุลไทย และ ชัยศรี แก้วสุรลิขิต. 2550. การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายไส้ไก่ที่ได้จากการเลี้ยงร่วมกับกุ้งกุลาดำ. น. 277-301. ใน รายงานฉบับสมบูรณ์: การวิจัยเพื่อพัฒนาการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ กุ้งขาวแวนนาไมและกุ้งก้ามกราม อย่างยั่งยืน (ปีที่ 3) เสนอต่อ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- พลยุทธ สุขสมิติ และ วิวัฒน์ โดธิกรกุล. 2549. รายงานติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมเมืองแร่ลุ่มแฟรม ประทานบัตรที่ 23164/15551(คำขอที่ 2/2544) ของนายสมชาย ยอดธง (บริษัท เอส. ซี. ไมนิ่ง จำกัด) บริเวณดอยโง้ม ต.บ้านปิน อ.ลอง จ.แพร่. กลุ่มส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เขต 3. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- พิมล เรียนวัฒนา และ ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2525. เคมีสภาวะแวดล้อม. โอเคียนสโตร์. กรุงเทพฯ.
- ยุวดี พีรพรพิศาล. 2546. สาหร่ายวิทยา (Phycology). ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วรวิทย์ ชีวารักษ์. 2542. การสะสมและการขยายตัวของสารพิษปรอทในสิ่งแวดล้อมชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- วิกัณดา ชัยบุตร. 2541. การศึกษาปริมาณโลหะหนักบางชนิดในน้ำ ดินตะกอน และเนื้อเยื่อส่วนต่างๆของปลาบางชนิด ในแม่น้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิระวงศ์ ตางาม. 2543. การศึกษาปริมาณโลหะหนักบางชนิดในน้ำ ดินตะกอนและเนื้อเยื่อส่วนต่างๆของปลาบางชนิดในแม่น้ำและคลองรอบเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- แหวตา ทองระอา, พรทิพย์ ตัดตะวะศาสตร์, รวีวรรณ สังขศิลาและ สุพจน์ ฐิตธรรมโม. 2532. ปริมาณการสะสมของโลหะหนักบางชนิดในหอยนางรมจากฟาร์มเลี้ยงหอยบริเวณอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน , ชลบุรี. 21 น.
- _____, นิรัช สุภาพล และตติยะ สีหรัย. 2535. ปริมาณโลหะหนักบางชนิดในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของปลาทะเลที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจจากสะพานปลาคลองสังเขป จังหวัดจันทบุรี . สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา , ชลบุรี. 16 น.
- สมลักษณ์ นงนุช. 2543. การศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในภาค ตะวันออกของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุคนธ์ เจียสกุล. 2523. การแปดเปื้อนของตะกั่วบนไม้ข้างถนนบางชนิดในเขตกรุงเทพมหานคร . วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุนันท์ ทวยเจริญ, วัลลพ คุ่มสุภา และ สุนิตย์ ปีทภาพงษ์. 2538. ปริมาณสาร โลหะหนักตกค้าง ในหอยหลอด ในน้ำทะเล และในดินตะกอน บริเวณแหล่งเลี้ยงตัวหอย จ .สมุทรสงคราม. น.677-684. ใน รายงานสัมมนาวิชาการประมงประจำปี 2538. กรมประมง, กรุงเทพฯ.
- สุวรรณิ แสงเพชรศิริพันธ์. 2546. การประเมินโลหะหนักรูปที่ละลายและแขวนลอยในน้ำทะเล บริเวณอ่าวเพ จังหวัดระยอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรภี โรจน์อารยานนท์. 2530. สภาวะแวดล้อมของเรา ตอนมลพิษสภาวะแวดล้อม. สถาบันวิจัย สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตร. สถิตินำเข้า- ส่งออก. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_website/oae_imex.php, 3 พฤษภาคม 2552.

- Almela, C., M.J. Clemente, D. Vélez and R. Montoro. 2006. Total arsenic, inorganic arsenic, lead and cadmium contents in edible seaweed sold in Spain. **Food and Chem. Toxicol.** 44: 1901-1908.
- APHA, AWWA and AWCA. 1995. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. United Book Press, Maryland.
- Berman, E. 1980. **Toxic Metals and their Analysis**. Cambridge University Press, London.
- Besada, V., J.M. Andrade, F. Schultze and J. J. González. 2009. Heavy metals in edible seaweeds commercialised for human consumption. **J. Mar. Syst.** 75: 305-313.
- Boyd, C.E. and I. Wuttisin. 2006. Physical and chemical Characteristics of sediment in catfish, freshwater prawn and carp ponds in Thailand. **Aquaculture** 37(12): 1202-1214.
- Boyer, E.K. and P. Fong. 2005. Macroalgal-mediated transfers of water column nitrogen to intertidal sediments and salt marsh plants. **J. Exp. Mar. Biol. and Ecol.** 321: 59-69.
- Caliceti, M., E. Argese, A. sfriso and B. Pavoni. 2002. Heavy metal concentration in the seaweeds of the Venice lagoon. **Chemosphere** 47: 443-454.
- Chapman, V.J. and D.J. Chapman. 1980. **Seaweed and Their Uses**. 3rd ed. The Camelot Press, London.
- Chester, R. and H. Voutsinon. 1981. The initial assessment of trace metal pollution in coastal sediments. **Mar. Pollut. Bull.** 12: 84-91.
- Conti, M.E. and G. Cecchetti. 2003. A biomonitoring study: trace metals in algae and molluscs from Tyrrhenian coastal areas. **Environ. Res.** 93: 99-112.

- Critchley, A.T. and M. Ohno. 1998. **Seaweed Resources of the World**. Kanagawa International Fisheries Training Centre, Japan International Cooperation Agency, Yokosuka.
- Daka, E.R. 2005. Heavy metal concentrations in *Littorina saxatilis* and *Enteromorpha intestinalis* from Manx Estuaries. **Mar. Pollut. Bull.** 50: 1433-1456.
- De Vitre', R., Belzilel N. and Tessier A. 1991. Speciation and adsorption of arsenic on diagenetic iron oxyhydroxides. **Limnol. Oceanogr.** 36 (7): 1480-1485.
- Duke, C.S., B.E. Lapointe and J. Ramus. (1986). Effects of light on growth, RuBPCase activity, and chemical composition of *Ulva* species (Chlorophyta). **J. Phycol.** 22: 362-370
- Eide, I., S. Myklestad and S. Melson. 1980. Long term uptake and release of heavy metals by *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. (Phaeophyceae). **In situ. Environ. Pollut.** 23: 19-28.
- Encyclopaedia Britannica. 1981. **Macropedia**. Chicago University, Chicago.
- Enk, M.D. and B.J. Mathis. 1977. Distribution of Cadmium and Lead in Stream Ecosystem. **Hydrobiologica** 52:153-158.
- Fong, P., F.J. Jon and C.R. Fong. 2004. Growth, nutrient storage, and release of dissolved organic nitrogen by *Enteromorpha intestinalis* in response to pulses of nitrogen and phosphorus. **Aquat. Bot.** 78: 83-95
- Foster, P. 1976. Concentrations and concentration factors of heavy metals in brown algae. **Environ. Pollut.** 10: 45-53.
- Friberg, L., M. Piscator, G. Nordberg and T. Kjellstrom. 1974. **Cadmium in the Environment**. 2nd ed. CRC. Press, Cleveland.

- Frenet, M. 1981. The Distribution of Mercury, Cadmium and Lead between Water and Suspended Matter in the Loire Estuary as a Function of the Hydrological Regime. **Water Res.** 15: 1345-1350.
- Haritonidis, S. and P. Malea. 1999. Bioaccumulation of metals by the green alga *Ulva rigida* from Thermaikos Gulf, Greece. **Environ. Pollut.** 104: 365-372.
- Harrison, R.M. and D.H. Laxen. 1981. **Lead Pollution Causes and Control**. The University Press, Cambridge.
- Hawley, G.C. 1977. **The Condensed Chemical Dictionary**. 9th ed. Van Nostran Reinhold, London.
- Ho, Y.B. 1987. Metals in 19 intertidal macroalgae in Hong Kong waters. **Mar. Pollut. Bull.** 18: 564-6.
- Kamala-Kannan, S., B. P. Dass Batvari, K. J. Lee, N. Kannan, R. Krishnamoorthy, K. Shanthi, M. Jayaprakash. 2008. Assessment of heavy metals (Cd, Cr and Pb) in water, sediment and seaweed (*Ulva lactuca*) in the Pulicat Lake, South East India. **Chemosphere** 71: 1233-1240.
- Howarth, R.S. and J.B. Sprague. 1978. Copper lethality to rainbow trout in waters of various hardness and pH. **Water Res.** 12: 455-462.
- Kamala-Kannan, S., B. Prabhu Dass Batvari, K. Jae Lee, N. Kannan, R. Krishna moorthy, K. Shanthi and M. Jayaprakash. 2008. Assessment of heavy metals (Cd, Cr and Pb) in water, sediment and seaweed (*Ulva lactuca*) in the Pulicat Lake, South East India. **Chemosphere** 71: 1233-1240.

- Lambou, V.W. 1972. **Problem of Mercury Emissions in to the Environment of the United States Environmental Protection Agency** . The United States Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Leal, M.C., M.T. Vasconcelos, I. Sousa -Pinto and J. P. S. Cabral. 1997. Biomonitoring with Benthic Macroalgae and Direct Assay of Heavy Metals in Seawater of the Oporto Coast (Northwest Portugal). **Mar. Pollut. Bull.** 34: 1006-1015.
- Lewmanomont, K. and H. Ogawa. 1995. **Common Seaweeds and Seagrasses of Thailand** . Integrated Promotion Technology, Bangkok.
- Lobban, C.S. and P.J. Harrison. 1994. **Seaweed Ecology and Physiology** . 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mambote, R.C.M., P. Krijgsman and M.A. Reuter. 2003. Hydrothermal pre cipitation of arsenic compounds in the ferric–arsenic (III)–sulfate system: thermodynamic modeling. **Minerals Engineering** 16: 429–440.
- Martins, I., O.M. José., F.R. Morgens and J.C. Marques. 1999. The e ffect of salinity on the growth rate of the macroalgae *Enteromorpha intestinalis* (Chlorophyta) in the Mondego estuary (west Portugal). **Acta Oecol. Int. J. Ecol.** 20: 259–265.
- McNeely, R.N., V.P. Neimaries and L. Dwyer. 1979. **Water Quality Source Book** . CSA Illumina Press, Canada.
- Mellors, J.E. 1991. An evaluation of a rapid visual technique for estimating seagrass biomass. **Aquat. Bot.** 42: 67-73.

- Morales, A.M., M.C. Valdeza, S.C. Domínguez, B.G. Acosta and F.G. Plerez. 2005. Chemical composition and microbiological assays of marine algae *Enteromorpha* spp. as a potential food source. **Journal of Food Composition and Analysis** 18: 79–88.
- Muller, M., M. Schirmer and J. Kettler. 1993. Use of *Enteromorpha intestinalis* (Chlorophyceae) for active biomonitoring of heavy metals in the Wesar estuary. **Neth. J. Aquat. Ecol.** 27: 189-195.
- Ohno, M. and A.T. Critchley. 1993. **Seaweed Cultivation and Marine Ranching**. Kanagawa International Fisheries Training Center, Japan International Cooperation Agency, Japan.
- Olivier, M., G. Desrosiers, A. Caron, C. Retiere and A. Calliou. 1997. Juvenile growth of *Nereis diversicolor* (O.F. Müller) feeding on a range of marine vascular and macroalgae plant sources under experimental conditions. **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** 208: 1-12.
- Padmavathiamma, P.K. and L. Y. Li. 2007. Phytoremediation Technology: Heavy metal accumulation in Plants. **Water Air Soil Pollut.** 184: 105-126.
- Richardson, B.J. 2009. Impact of a coastal dump in a tropical lagoon on trace metal concentrations in surrounding marine biota: A case study from Saipan, Commonwealth of the Northern Mariana Islands (CNMI). **Mar. Pollut. Bull.** 58: 424-455.
- United States Environmental Protection Agency. 1977. **Water Quality Criteria**. National Academy of Science, National Academic of Engineering. Washington D. C.
- Waaland, J.R. 1977. **Common Seaweed of the Pacific Coast**. Pacific Search Press, Seattle.
- Wennhage, H. and L. Pihl. 1994. Substratum selection by juvenile plaice (*Plauronectes platessa* L.): impact of benthic microalgae and filamentous macroalgae. **Neth. J. Sea Res.** 32: 343-351.

Wheeler, P.A. and B.R. Björnsäter. 1992. Seasonal fluctuations in tissue nitrogen, phosphorus and N : P for five macroalgae species common to the Pacific northwest coast. **J. Phycol.** 28: 1-6.

Wood, J.M. 1975. Metabolic Cycles for Toxic Elements in the Environment. A Study of Kinetic and Mechanism, pp. 257-261. In P. Q. Krenkel(ed.). 1975. **Heavy metals in the Aquatic Environment**. Pergamon Press, Oxford.

bikowski, R., P. Szefer and A. Latała. 2006. Distribution and relationships between selected chemical elements in green algae *Enteromorpha* sp. from the southern Baltic. **Environ. Pollut.** 143: 435-448.

_____. 2007. Comparison of green algae *Cladophora* sp. and *Enteromorpha* sp. as potential biomonitors of chemical elements in the southern Baltic. **Sci. Total Environ.** 387: 320–332.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 คุณสมบัติของน้ำในบ่อควบคุมและบ่อทดลองที่มีสาหร่ายสีเขียว

วันที่	บ่อ	Trans. (cm)	Temp. (°C)		pH		DO (mg/l)		Salinity (psu)	EC. (mS/cm)	Tot. Alk. (mg/l)	Hardness (mg/l)	TAN (mg/l)	Nitrite (mg/l)
			เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย						
0	บ่อควบคุม1	100	28.3	30.8	7.3	8.0	5.6	7.4	13.5	21.20	280.2	2348	4.4	0.500
	บ่อควบคุม2	100	28.2	30.1	7.7	8.2	4.8	7.8	14.5	23.21	294.6	3236	3.5	0.450
	บ่อควบคุม3	100	28.4	30.8	7.3	8.1	4.3	8.2	14.0	21.45	288.7	2348	4.2	0.520
	บ่อทดลอง1	90	28.2	29.7	8.1	8.3	4.9	7.4	10.8	25.02	270.8	3216	5.7	0.014
	บ่อทดลอง2	90	28.3	29.6	7.9	8.1	5.7	7.3	8.4	23.55	266.7	3099	3.5	0.018
	บ่อทดลอง3	90	28.2	29.9	8.0	8.2	5.2	7.4	13.4	22.78	266.3	2878	5.5	0.007
14	บ่อควบคุม1	100	28.2	30.2	7.2	8.1	4.2	9.5	13.0	21.73	263.3	2162	3.5	0.520
	บ่อควบคุม2	80	28.1	30.4	7.6	8.1	4.3	8.2	14.5	22.51	284.2	3456	2.3	0.018
	บ่อควบคุม3	100	28.1	30.2	7.2	8.3	5.5	9.0	16.1	23.50	264.1	2162	3.5	0.650
	บ่อทดลอง1	80	28.3	31.2	7.8	8.2	5.1	7.6	15.7	23.55	266.5	3161	5.5	0.007
	บ่อทดลอง2	80	28.2	30.5	8.0	8.2	5.9	6.7	11.9	22.78	254.3	2865	3.7	0.014
	บ่อทดลอง3	80	28.1	31.0	7.9	8.4	5.3	7.3	8.7	20.61	263.7	2883	5.1	0.007

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

วันที่	บ่อ	Trans. (cm.)	Temp. (°C)		pH		DO (mg/l)		Salinity (psu)	EC. (mS/cm)	Tot. Alk. (mg/l)	Hardness (mg/l)	TAN (mg/l)	Nitrite (mg/l)
			เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย						
			28	บ่อควบคุม1	95	28.5	30.6	7.5						
	บ่อควบคุม2	70	28.4	30.8	7.9	8.2	4.9	7.2	13.6	22.29	263.3	3020	1.2	0.021
	บ่อควบคุม3	90	28.4	30.6	7.4	8.1	4.3	6.7	14.2	24.11	240.7	1981	3.6	0.766
	บ่อทดลอง1	70	28.6	29.8	8.1	8.2	5.2	8.1	13.4	23.80	250.7	3020	5.2	0.007
	บ่อทดลอง2	70	28.4	31.1	8.1	8.2	6.2	8.9	12.8	18.63	266.7	2912	3.5	0.018
	บ่อทดลอง3	90	28.2	29.9	8.0	8.2	5.2	7.4	12.7	18.31	252.3	2928	4.4	0.010
42	บ่อควบคุม1	90	28.3	29.9	7.3	8.2	4.1	8.1	14.3	23.75	196.4	1881	6.9	0.766
	บ่อควบคุม2	60	28.2	30.2	7.4	8.1	3.9	8.3	15.5	25.60	240.7	3176	1.4	0.064
	บ่อควบคุม3	90	28.2	29.9	7.2	8.2	5.4	7.5	14.1	23.80	277.3	1881	4.4	0.862
	บ่อทดลอง1	50	28.2	29.9	8.2	8.3	5.7	8.2	12.3	20.60	254.0	2970	3.8	0.021
	บ่อทดลอง2	50	28.3	30.6	8.0	8.8	5.5	8.5	12.9	21.45	254.3	2865	3.2	0.014
	บ่อทดลอง3	80	28.1	29.1	7.8	8.3	5.3	7.3	9.0	14.32	240.7	2970	3.5	0.021

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

วันที่	บ่อ	Trans. (cm.)	Temp. (°C)		pH		DO (mg/l)		Salinity (psu)	EC. (mS/cm)	Tot. Alk. (mg/l)	Hardness (mg/l)	TAN (mg/l)	Nitrite (mg/l)
			เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย						
56	บ่อควบคุม1	80	27.9	31.1	7.2	8.1	5.8	7.6	13.2	25.00	122.7	1720	5.8	0.862
	บ่อควบคุม2	50	28.4	30.8	7.5	8.3	4.1	5.6	13.7	25.07	170.7	3014	1.1	0.032
	บ่อควบคุม3	80	28.5	30.9	7.3	8.1	4.2	6.7	14.6	24.61	167.0	1720	5.7	0.766
	บ่อทดลอง1	27	28.6	30.2	8.1	8.2	4.3	6.3	12.7	21.29	184.0	2865	1.2	0.025
	บ่อทดลอง2	28	28.2	30.6	7.9	8.2	5.2	8.3	11.7	19.70	166.0	2709	1.2	0.025
	บ่อทดลอง3	50	27.8	30.6	8.0	8.2	5.2	8.3	12.2	18.35	174.7	2890	1.7	0.025
70	บ่อควบคุม1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	บ่อควบคุม2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	บ่อควบคุม3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	บ่อทดลอง1	25	28.2	31.1	7.6	8.2	4.8	8.4	12.0	20.3	197.3	2372	0.6	0.032
	บ่อทดลอง2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	บ่อทดลอง3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการเก็บ

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณปรอทในสาหร่ายไส้ไก่ มวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ และปริมาณปรอทที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อดทดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่

วันที่	บ่อดทดลองที่ 1			บ่อดทดลองที่ 2			บ่อดทดลองที่ 3		
	ปริมาณปรอท ในสาหร่าย	มวลชีวภาพ	ปริมาณปรอทที่ สาหร่ายทั้งหมด	ปริมาณปรอท ในสาหร่าย	มวลชีวภาพ	ปริมาณปรอทที่ สาหร่ายทั้งหมด	ปริมาณปรอท ในสาหร่าย	มวลชีวภาพ	ปริมาณปรอทที่ สาหร่ายทั้งหมด
	(µg/kg dry weight)	(kg/บ่อ)	ดูดซับได้ (µg)	(µg/kg dry weight)	(kg/บ่อ)	ดูดซับได้ (µg)	(µg/kg dry weight)	(kg/บ่อ)	ดูดซับได้ (µg)
0	6.14	30.27	185.86	4.61	50.54	232.98	8.29	31.72	259.22
14	5.83	93.27	543.76	6.14	64.37	395.23	5.53	49.06	271.30
28	5.83	107.07	624.22	3.07	113.16	347.40	10.44	69.27	723.18

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณตะกั่วในสาหร่ายสีเขียว มวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว และปริมาณตะกั่วที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่

วัน	บ่อดลอง 1			บ่อดลอง 2			บ่อดลอง 3		
	ปริมาณตะกั่ว ในสาหร่าย	มวลชีวภาพ	ปริมาณตะกั่วที่ สาหร่าย ทั้งหมด ดูดซับได้	ปริมาณตะกั่วใน สาหร่าย	มวลชีวภาพ	ปริมาณตะกั่วที่ สาหร่าย ทั้งหมด ดูดซับได้	ปริมาณตะกั่วใน สาหร่าย	มวลชีวภาพ	ปริมาณตะกั่วที่ สาหร่าย ทั้งหมด ดูดซับได้
	(µg/kg dry weight)	(kg/บ่อ)	(µg)	(µg/kg dry weight)	(kg/บ่อ)	(µg)	(µg/kg dry weight)	(kg/บ่อ)	(µg)
0	65.08	30.27	1,969.97	83.50	50.54	4,220.09	105.61	31.72	3,349.94
14	71.53	93.27	6,671.60	77.98	64.37	5,019.57	208.15	49.06	10,211.84
28	36.84	107.07	3,944.46	88.70	113.16	10,037.29	834.73	69.27	57,821.75

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณสังกะสีในสาหร่ายไสล่ไก่ มวลชีวภาพของสาหร่ายไสล่ไก่ และปริมาณสังกะสีที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อทดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่

วัน	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3		
	ปริมาณสังกะสี ในสาหร่าย($\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณสังกะสี ที่สาหร่าย ทั้งหมดดูดซับ ได้ (μg)	ปริมาณสังกะสี ในสาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณสังกะสีที่ สาหร่ายทั้งหมด ดูดซับได้ (μg)	ปริมาณสังกะสี ในสาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณสังกะสีที่ สาหร่ายทั้งหมด ดูดซับได้ (μg)
0	2,320.00	30.27	70,226.40	768.00	50.54	38,814.72	2,801.00	31.72	88,847.72
14	3,767.00	93.27	351,348.09	873.00	64.37	56,195.01	3,553.00	49.06	174,310.18
28	307.00	107.07	32,870.49	662.00	113.16	74,911.92	366.00	69.27	25,352.82

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 5 ปริมาณแคดเมียมในสาหร่ายไส้ไก่ มวลชีวภาพของสาหร่ายไส้ไก่ และปริมาณแคดเมียมที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อทดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่

วัน	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3		
	ปริมาณ แคดเมียมใน สาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg dry}$ weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณ แคดเมียม ที่สาหร่าย ทั้งหมดดูดซับ ได้ (μg)	ปริมาณ แคดเมียมใน สาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg dry}$ weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณ แคดเมียม ที่สาหร่าย ทั้งหมดดูดซับ ได้ (μg)	ปริมาณ แคดเมียมใน สาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg dry}$ weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณ แคดเมียม ที่สาหร่าย ทั้งหมดดูดซับ ได้ (μg)
0	8.90	30.27	269.40	6.75	50.54	341.15	7.06	31.72	223.94
14	7.68	93.27	716.31	6.14	64.37	395.23	10.44	49.06	512.19
28	6.14	107.07	657.41	7.68	113.16	869.07	7.68	69.27	531.93

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 6 ปริมาณสารหนูในสาหร่ายใ้สีไ้่ มวลชีวภาพของสาหร่ายใ้สีไ้่ และปริมาณสารหนูที่สาหร่ายทั้งหมดดูดซับได้ในบ่อดทดลองขนาดพื้นที่ 4 ไร่

วัน	บ่อดทดลอง 1			บ่อดทดลอง 2			บ่อดทดลอง 3		
	ปริมาณสารหนู ในสาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg dry}$ weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณสารหนู ที่สาหร่าย ทั้งหมด ดูดซับได้ (μg)	ปริมาณสารหนู ในสาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg dry}$ weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณสารหนู ที่สาหร่าย ทั้งหมด ดูดซับได้ (μg)	ปริมาณสารหนู ในสาหร่าย ($\mu\text{g}/\text{kg dry}$ weight)	มวลชีวภาพ (kg/บ่อ)	ปริมาณสารหนู ที่สาหร่าย ทั้งหมด ดูดซับได้ (μg)
1	192.00	30.27	5,811.84	212.00	50.54	10,714.48	185.00	31.72	5,868.20
14	391.00	93.27	36,468.57	166.00	64.37	10,685.42	1,133.00	49.06	55,584.98
28	156.00	107.07	16,702.92	2,713.00	113.16	307,003.08	45.00	69.27	3,117.15

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกมลพรรณ ไชยทอง
เกิดวันที่	23 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (การประมง) เกียรตินิยมอันดับสอง มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-