



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ

Bioaccumulation of cadmium via aquatic food chain

โดย สุณีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

มิถุนายน 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ

Bioaccumulation of cadmium via aquatic food chain

ผู้วิจัย

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. นางสาวสุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง
คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
(นักวิจัยที่ปรึกษา) |
| 2. ศ. ลัดดา วงศ์รัตน์ | คณะประมง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ดีด้วยการได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภททุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ จาก “สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)” ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

รหัสโครงการ :TRG4680010

ชื่อโครงการ : การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ

ชื่อนักวิจัย : สุรินทร์ เรืองสมบูรณ์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

E-mail Address: krsuneer@kmitl.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี (1 กรกฎาคม 2546-30 มิถุนายน 2547)

บทคัดย่อ

การศึกษาการสะสมแคดเมียมในระบบทดลองซึ่งประกอบด้วย น้ำ ดิน แพลงก์ตอนพืช (*Chlorella regularis*) แพลงก์ตอนสัตว์ (*Moina macrocopa*) และปลาดุกบิ๊กอุย (hybrid catfish) ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อทราบถึงปริมาณการสะสมแคดเมียมในสิ่งต่าง ๆ ที่ประกอบในระบบทดลอง หลังจากแคดเมียมเข้าสู่แหล่งน้ำ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงสู่แหล่งน้ำของระบบทดลอง แคดเมียมลดลงจากน้ำอย่างรวดเร็วโดยภายใน 30 นาที แคดเมียมลดลงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง มีปริมาณแคดเมียมคงเหลืออยู่ในน้ำ 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และแคดเมียมมีการสะสมอยู่มากที่สุดในแพลงก์ตอนพืช รองลงมาคือแพลงก์ตอนสัตว์ ดิน และปลา โดยสะสมในปริมาณ 586.18 ± 23.37 , 141.52 ± 26.74 , 5.53 ± 0.26 , และ 1.54 ± 0.15 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณแคดเมียมที่พบในสิ่งมีชีวิตในระบบทดลองกับปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำ พบว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในแพลงก์ตอนพืชมีความสัมพันธ์มากที่สุดกับปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำ ดังนั้นแพลงก์ตอนพืชจึงน่าจะสามารถใช้เป็นดัชนี (biomonitoring) ของแคดเมียมในแหล่งน้ำได้

การศึกษาการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำจำลอง เพื่อศึกษาถึงการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมจากผู้ผลิตขั้นต้น (แพลงก์ตอนพืช) ไปยังผู้บริโภคขั้นต้น (แพลงก์ตอนสัตว์) และไปยังผู้บริโภคขั้นที่สอง (ปลา) โดยนำแพลงก์ตอนพืชที่สัมผัสสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 2 วัน และมีการสะสมแคดเมียมไว้ที่เซลล์ไปเป็นอาหารของไรแดง จากนั้นนำไรแดงไปเป็นอาหารปลาดุก พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา ในปริมาณ $1,140 \pm 20.06$, 56.6 ± 3.23 และ 1.05 ± 0.06 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

คำสำคัญ : แคดเมียม ห่วงโซ่อาหารสัตว์น้ำ คลอเรลลา ไรแดง ปลาดุก

Project Code: TRG4680010

Project Title: Bioaccumulation of cadmium via aquatic food chain.

Investigator: Suneerat Ruangsomboon

Department of Fisheries Science

Faculty of Agricultural Technology

King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail Address: krsuneer@kmitl.ac.th

Project Period: 1 year (1 July 2003-30 June 2004)

Abstract

The accumulation of cadmium in aquatic system, composed of water, sediment, phytoplankton (*Chlorella regularis*), zooplankton (*Moina macrocopa*), and fish (hybrid catfish) were studied in laboratory. The experiment aim to determine amount of cadmium accumulation in each organism, after cadmium was input to the aquatic system. The result showed that 30 minutes after 3.5 mg L^{-1} of cadmium input to the system, ca. 80 % of cadmium loss from the system. After 72 hrs of exposure the residual cadmium remain in water was 1.76 mg L^{-1} . The maximum accumulation of cadmium was found in phytoplankton (586.18 ± 23.37) followed by zooplankton (141.52 ± 26.74), sediment (5.53 ± 0.26) and fish ($1.54 \pm 0.15 \mu\text{g g}^{-1}$ dry wt). The high correlation was observed between cadmium in phytoplankton and cadmium in water. The results suggested that phytoplankton may used as a biomonitoring agent for cadmium in water source.

The accumulation of cadmium in model of aquatic trophic levels were studied. The experiment aim to determine the accumulation of cadmium in primary producer (phytoplankton) when transferred to primary consumer (zooplankton) and secondary consumer (fish). Phytoplankton which exposed to 3.5 mg L^{-1} of cadmium solution for 2 days, which accumulated cadmium in their cell were fed to zooplankton for 2 days, after that this zooplankton were fed to fish for 60 days. The accumulation of cadmium in phytoplankton, zooplankton and fish were $1,140 \pm 20.06$, 56.6 ± 3.23 and $1.05 \pm 0.06 \mu\text{g L}^{-1}$ dry wt. respectively.

Key words : cadmium, aquatic trophic level, *Chlorella regularis*, *Moina macrocopa*, catfish

Executive summary

Bioaccumulation of Cadmium via aquatic food chain

The presence of metals in the environment is partially due to natural process, but is mostly the result of industrial waste. Contamination of aquatic ecosystems with heavy metal has increased worldwide problem. Cadmium (Cd) are mainly used for Cd batteries, anti-corrosive coating of metals, and pigments, and as stabilizers for plastic.

Heavy metals enter the aquatic food chain through direct consumption of water or biota and through nondietary routes, such as uptake through absorbing epithelia (i.e., the gills in the case of fish). For fish, the gills, skin, and digestive tract are potential sites of absorption of water borne chemicals.

Sediment sample was used as a representative of the study area in terms of heavy metal contamination. Sediment particles were potentially important sources of metal uptake by benthic organism. Thus in this study, we investigate the accumulation of Cd in aquatic ecosystem with and with out sediment. The results showed the amount of Cd accumulated in phytoplankton was higher than sediment at the same dry wt.

Fish are often at the top of the aquatic food chain and may concentrate large amounts of some metals from the water. Accumulation patterns of contaminants in fish depend both on uptake and elimination rates. The presence of heavy metals in different foods constitutes serious health hazards, depending on their relative levels. For example, Cd injures the kidney and cause symptoms of chronic toxicity, including impaired kidney function, tumors and hepatic dysfunction.

Thus in this study, we investigate the accumulation of Cd in fish via aquatic food chain; phytoplankton, and zooplankton. The results showed the amount of Cd accumulated in flesh fish was slightly higher than permissible limit, when the initial Cd concentration released to the water source was 3.5 mg L^{-1} .

While phytoplankton and zooplankton accumulate metals to a high level, fish accumulate low level of Cd, because fish regulate internal concentrations and sequestration with cellular binding proteins; metallothioneins.

One of the criteria when an organism is proposed as a biomonitoring agent is a simple correlation between pollutant levels present in the organism and those in it environment. In this study the results showed that high correlation was observed between Cd in *Chlorella* and Cd in the water. The results suggested that phytoplankton may used as a biomonitoring agent for cadmium in water source.

However, many type of fish are herbivore which directly feed on phytoplankton. They may received higher amount of Cd than this study which fish feed on zooplankton; omnivorous fish. Thus it should be study the accumulation of Cd in herbivorous fish in the next step.

การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ

Bioaccumulation of cadmium via aquatic food chain

คำนำ

การเพิ่มขึ้นของประชากรและการพัฒนาประเทศในปัจจุบันส่งผลให้มีการขยายตัวของแหล่งชุมชน และมีการพัฒนาวิธีการเพิ่มผลผลิตทางด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม เพื่อรองรับความต้องการในการอุปโภค บริโภคของมนุษย์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดปัญหามลภาวะต่าง ๆ ขึ้น ปัญหาที่ปรากฏชัดคือ ปัญหามลภาวะทางน้ำ เช่นเกิดการเน่าเสียของน้ำเนื่องจากการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งเกษตรกรรม ฟาร์มสัตว์น้ำ เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำเนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำทิ้งระบายจากแหล่งเกษตรกรรมที่มีการใช้สารฆ่าแมลง สารกำจัดศัตรูพืช ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งคือปัญหาการสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ ซึ่งแหล่งที่มาของโลหะหนักเหล่านี้โดยมากปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการเกษตรซึ่งมีส่วนผสมของโลหะหนัก หรือมาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่นร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ ล้วนแต่เป็นผลทำให้มีการแพร่กระจายของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ และสิ่งที่ควรตระหนักอย่างยิ่งคือโลหะหนักเมื่อลงสู่แหล่งน้ำนั้นไม่มีการสลายตัวไป แต่ถูกดูดซับเข้าไปสะสมอยู่ในดินตะกอนและสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยอยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษชั่วคราว ดังนั้นเมื่อทำการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำจึงพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย แต่แท้จริงแล้วยังมีปริมาณโลหะหนักอยู่ในแหล่งน้ำนั้นมากกว่าที่ตรวจพบในน้ำหลายร้อยเท่า โดยโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้เหล่านั้นสามารถก่อให้เกิดอันตรายทันทีเมื่อสภาพทางกายภาพหรือทางเคมีของน้ำเปลี่ยนแปลง (เช่นพีเอชลดลง) แม้จะมีมาตรการในการควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำและมีการบังคับให้มีการบำบัดน้ำเสียก่อนแต่พบว่ายังมีการหลีกเลี่ยง ละเลย อีกทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดของหลายโรงงานยังไม่ดีพอ จึงทำให้ยังคงมีปริมาณโลหะหนักจำนวนมากถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

ในปัจจุบันแนวโน้มของการสะสมโลหะหนักในสัตว์น้ำมีเพิ่มมากขึ้น (พัชรา, 2531) ซึ่งสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักต่าง ๆ ไว้ในร่างกายได้เป็นปริมาณสูง อีกทั้งยังสามารถถ่ายทอดและเพิ่มปริมาณขึ้นตามห่วงโซ่อาหาร (Menesveta, 1976) ตั้งแต่ผู้ผลิต ผู้บริโภคชั้นที่ 1 จนถึงผู้บริโภคชั้นสุดท้ายในน้ำคือปลา ส่วนมนุษย์ได้รับอันตรายจากโลหะหนักในฐานะผู้บริโภคลำดับสุดท้ายในห่วงโซ่อาหาร โดยมีรายงานว่าในปี 2540 มีผู้ป่วยได้รับพิษจากโลหะหนัก 211 ราย เสียชีวิต 1 ราย (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

การศึกษาการแพร่กระจายของโลหะหนักที่สะสมในระบบนิเวศทางน้ำมีการศึกษากันแพร่หลายในต่างประเทศและมีการกำหนดดัชนีชีวภาพ (Biomonitoring) ของโลหะหนักแต่ละชนิดขึ้นใช้อย่างแพร่หลาย ส่วนในประเทศไทยนิยมศึกษาถึงปริมาณของโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำซึ่งเป็นการ

ศึกษาทางกายภาพ เคมี ไม่มีการศึกษาทางชีวภาพ ส่วนการศึกษาในสัตว์น้ำมีการทำน้อยเนื่องจากมีความไม่สะดวกในการจับสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ๆ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงไม่ครอบคลุมเพียงพอ และยังไม่มีการศึกษาถึงสัดส่วนที่แท้จริงของปริมาณโลหะหนักเมื่อลงสู่แหล่งน้ำแล้วไปสะสมอยู่ในดินตะกอน แพลงก์ตอนพืช หรือแพลงก์ตอนสัตว์เท่าใด และมีอัตราการถ่ายทอดของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหารในปริมาณเท่าใด ซึ่งการศึกษากการถ่ายทอดและการสะสมโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตเป็นข้อมูลที่สำคัญในการบ่งบอกถึงระดับอันตรายและความเสี่ยงของผู้บริโภค โดยเฉพาะการศึกษาถึงการสะสมของโลหะหนักในปลา ซึ่งอยู่ชั้นบนสุดของห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน์ทางน้ำ เป็นสัตว์น้ำที่ประชาชนส่วนใหญ่นิยมบริโภคเนื่องจากเชื่อว่าเป็นอาหารประเภทเนื้อสัตว์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และยังเป็นทรัพยากรที่สำคัญทางเศรษฐกิจอีกด้วย

ในแหล่งน้ำมีโลหะหนักที่เป็นอันตรายปนเปื้อนอยู่หลายชนิด ซึ่งแคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่เป็นอันตรายสูง มีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำถึง 8,000 ตันต่อปี (สุชาติ, 2540) และสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งทำให้มนุษย์ที่บริโภคสัตว์น้ำได้รับอันตราย คือกระดูกอ่อนแอ แดกหักง่าย (โรคอิไต อิไต) เป็นมะเร็ง และระบบไตถูกทำลาย ซึ่งแคดเมียมปริมาณมากที่ลงสู่แหล่งน้ำนี้จะเหลือปรากฏในน้ำเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่ถูกดูดซับโดยดินตะกอนและสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งไม่ทราบถึงสัดส่วนที่แน่นอนว่าอยู่ในส่วนใดในปริมาณเท่าใด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงข้อมูลสัดส่วนการสะสมและการถ่ายทอดของแคดเมียมในห่วงโซ่อาหารเพื่อเป็นข้อมูลในการทำนายปริมาณแคดเมียมที่แท้จริงที่มีอยู่ในแหล่งน้ำและในห่วงโซ่อาหารแต่ละระดับและหาแนวทางป้องกันอันตรายจากโลหะหนักที่จะเกิดขึ้นต่อผู้บริโภค

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสัดส่วนการแพร่กระจาย การถ่ายทอดปริมาณแคดเมียม ที่สะสมในน้ำ ดินตะกอน และแพลงก์ตอนพืช
2. ศึกษาการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมไปยังขั้นต่าง ๆ ในห่วงโซ่อาหาร
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำและในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา
4. ศึกษาหาสิ่งมีชีวิตในน้ำที่สามารถเป็นดัชนี (bioindicator) ของแคดเมียมได้

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหามลพิษทางน้ำจากโลหะหนักที่มีมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ตั้งอยู่ติดแหล่งน้ำสาธารณะจึงมีการระบายน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำโดยตรงซึ่งในน้ำทิ้งมีการปนเปื้อนของปรอท ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ทองแดง ฯลฯ (Jackson, 1996; Raven, 1993) ซึ่งพบว่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของโรงงานอุตสาหกรรมทิ้งน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด (พรสวรรค์, 2529) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณโลหะหนักเหล่านี้อยู่ในน้ำธรรมชาติไม่เกิน 0.0005, 0.05, 0.001, 0.1 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Sindermann, 1996) ซึ่งผลกระทบจากพิษของโลหะหนักนี้มีอันตรายต่อมนุษย์โดยตรง มีรายงานผู้ป่วยได้รับพิษโลหะหนักถึง 211 ราย และเสียชีวิต 1 รายในปี 2540 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

การแพร่กระจายของโลหะหนักในแหล่งน้ำ พบว่าเมื่อโลหะหนักสัมผัสสู่แหล่งน้ำจะมีปริมาณลดลงทันทีโดยถูกดูดซับโดยดินตะกอนและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ เช่น แพลงก์ตอน และเคลื่อนย้ายสู่สิ่งมีชีวิตที่สูงกว่าในห่วงโซ่อาหาร (Wangersky, 1986) ซึ่งปริมาณของโลหะหนักที่หายไปจากน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ในแหล่งน้ำและชนิดของโลหะหนัก เช่น โลหะทองแดงพบว่าตกตะกอนในรูปเกลือของโลหะทันทีที่น้ำเสียปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมสัมผัสกับแหล่งน้ำธรรมชาติถึง 75 เปอร์เซ็นต์ (Wilber, 1971) ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าค่าความเป็นกรดของน้ำเพิ่มขึ้นตะกอนเหล่านี้จะละลายและโลหะหนักจะอยู่ในรูปที่เป็นพิษทันที การศึกษาการแพร่กระจายของโลหะหนักโดย Paulson และคณะ (1984) พบว่าในตะกอนมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าในน้ำ

การสะสมของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตและในห่วงโซ่อาหารนั้นอาศัยขบวนการดูดซึมโลหะจากน้ำโดยสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช ซึ่งสามารถสะสมไว้ได้ในปริมาณสูงกว่าที่ปรากฏอยู่ในสิ่งแวดล้อมหลายเท่า (Knauer and Martin, 1973; Inthorn, 2001) เช่น ไดอะตอมทะเล สะสมโลหะหนักไว้เป็น 10^2 - 10^6 เท่าของในน้ำ (Frache et al., 1976) ส่วนการสะสมของโลหะในสัตว์น้ำเช่น ปลา ได้มาจากอาหารที่กินเข้าไปมากกว่าที่ละลายอยู่ในน้ำ (Bryan et al., 1977)

มีรายงานว่า การสะสมโลหะสังกะสี โคบอลต์ และโครเมียมในหอยนางรมที่เลี้ยงในธรรมชาติมาจากการกินอาหารของหอย (Preston, 1971) ส่วนการสะสมสังกะสีในปลาได้มาจากอาหารมากกว่าจากการดูดซึมจากน้ำ 2.5 เท่า (Renfro et al., 1975) โดยโลหะหนักที่สะสมในร่างกายสัตว์จะแพร่กระจายไปยังอวัยวะส่วนต่าง ๆ ทั้งกล้ามเนื้อและอวัยวะภายใน

การศึกษากายาบทอดของตะกั่วจากแพลงก์ตอนพืชไปยังแพลงก์ตอนสัตว์พบว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติแพลงก์ตอนพืชจะดูดซึมตะกั่วจากน้ำและถ่ายทอดต่อไปโดยการกินของโคฟีพอดและพบว่าปริมาณตะกั่วสูงขึ้นใน Euphausia ที่กินโคฟีพอดเป็นอาหาร (Romeo and Nicolas, 1986) ซึ่งเห็นว่า Euphausia ซึ่งเป็นแพลงก์ตอนสัตว์จะสามารถถ่ายทอดโลหะหนักต่อไปตามห่วงโซ่อาหาร

โดยการกินของสัตว์น้ำที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่นปลาได้ ซึ่งได้มีรายงานว่าปลาที่อาศัยอยู่ในธรรมชาติ และอยู่ในระดับ trophic level สูงกว่าจะสะสมปริมาณโลหะหนักปรอทได้สูงกว่า trophic level ที่ต่ำ ลงมาตามห่วงโซ่อาหาร (Menesveta, 1976) ซึ่งไม่สอดคล้องกับการรายงานของพัชรา (2531) ที่ ศึกษาการสะสมโลหะหนักในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์และสัตว์น้ำในอ่าวไทยตอนในและ รายงานว่าการสะสมของโลหะหนักทุกชนิดในห่วงโซ่อาหารมีความแตกต่างกันมาก โดยพบว่า แพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ซึ่งอยู่ในห่วงโซ่อาหารขั้นต่ำมีการสะสมโลหะหนักทุกชนิดสูงกว่าสัตว์ทะเลชนิดอื่น

การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณโลหะหนักในน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำสามารถใช้ประโยชน์ในการหาดัชนีชีวภาพ Biomonitoring ได้ การประเมินพิษของโลหะหนักในแหล่งน้ำของ Fernanda และคณะ (1997) ซึ่งทำการวัดปริมาณโลหะหนักในสาหร่าย *Enteromorpha* และ *Porphyra* พบว่าสามารถใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักในสาหร่ายประมาณค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก (แคดเมียม ทองแดง และปรอท) ในน้ำทะเลได้ ซึ่งมีขั้นตอนง่ายกว่าและสะดวกในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าโลหะหนักจากน้ำทะเลได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาของ Storelli และคณะ (2001) ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณโลหะหนักที่สะสมในสัตว์หน้าดิน สาหร่ายทะเล และดิน ตะกอนในเขตชายฝั่งทะเล พบว่าปริมาณโลหะหนัก (ปรอทและทองแดง) ในสัตว์หน้าดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักที่พบในดินตะกอน จึงสามารถใช้สัตว์หน้าดินนี้เป็น bioindicator ของโลหะหนักนี้ได้

แหล่งน้ำต่าง ๆ ในประเทศไทยมีการปนเปื้อนด้วยโลหะหนักหลายชนิด แคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งซึ่งมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสูงถึง 8,000 ตันต่อปี (สุชาติ, 2540) ซึ่งแคดเมียมเหล่านี้เมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะถูกดูดซับไปโดยดินตะกอน แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ซึ่งปลาเป็นผู้บริโภคลำดับสุดท้ายในห่วงโซ่อาหารในน้ำ ดังนั้นมนุษย์ที่นำสัตว์น้ำเหล่านี้มาบริโภคจึงได้รับผลกระทบจากแคดเมียมที่สะสมอยู่ในตัวปลา

แคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำโดยปนอยู่ในน้ำทิ้งจากเหมืองสังกะสีและดีบุก น้ำเสียจากโรงงานทำโลหะผสมและชุบโลหะ น้ำล้างในการทำแผ่นขั้วไฟฟ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้า และโลหะอื่น ๆ เป็นต้น มีการคาดการณ์ว่ามีแคดเมียมปนเปื้อนลงสู่ทะเลของโลกประมาณ 8000 ตันต่อปี ส่วนการผสมของแคดเมียมในน้ำทะเลและสัตว์น้ำมักจะสะสมในแพลงก์ตอนพืช ซึ่งอยู่ในรูปแคดเมียมฟอสเฟต และเข้าสู่สัตว์น้ำทางห่วงโซ่อาหาร เมื่อร่างกายมีการสะสมแคดเมียมเกินขีดความปลอดภัยจะมีอาการที่สังเกตได้คือ พบโปรตีน เช่น อัลบูมิน (albumin) ในปัสสาวะ เนื่องจากระบบการทำงานของไตถูกทำลาย ปัสสาวะมีสีน้ำตาลและพบกรดอะมิโนและแคดเมียมสูง ทำให้เกิดการเสียสมดุลของแคดเมียมในร่างกาย (สุชาติ, 2540) มนุษย์อาจได้รับแคดเมียมโดยการหายใจซึ่งจะจับที่ปอด บางส่วนเข้าไปอยู่ที่ตับ ไต และเส้นเลือด ทำให้เกิดการเสื่อมโทรมของอวัยวะดังกล่าว หรืออาจได้รับแคดเมียมจากน้ำดื่มเนื่องจากการละลายของโลหะ

บางชนิด มาตรฐานน้ำดื่มควรมีแคดเมียมเจือปนอยู่ไม่เกิน 10 ส่วนในพันล้านส่วน การสะสมของแคดเมียมในร่างกายประมาณ 1000-1200 มิลลิกรัม อาจทำให้เกิดโรคพิษของแคดเมียมขึ้นได้ การวิจัยพบว่าแคดเมียมมีอันตรายต่อหัวใจ ในสัตว์ที่ทดลองพบว่าทำให้เป็นหมัน เป็นเนื้องอก โรคไต ในอดีตพิษของแคดเมียมที่พบคือหลังสงครามโลกครั้งที่สองในประเทศญี่ปุ่น เมืองโทยามา ประชาชนเกิดอาการเจ็บป่วยตามบริเวณกระดุก เป็นนอย เกิดการแตกหรือหักงอของกระดูก ความดันโลหิตสูง อาจเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งและอาจมีผลทางพันธุกรรม ซึ่งโรคนี้เรียกว่า อิตา-อิตา (itai-itai)

ปัจจุบันการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเพื่อเฝ้าระวังอันตรายและเป็นข้อมูลความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคสัตว์น้ำนั้น นิยมตรวจวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำ เนื่องจากความสะดวกในการเก็บตัวอย่าง แต่ยังคงขาดข้อมูลที่จะชี้ถึงความสัมพันธ์ของปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำกับปริมาณโลหะหนักที่จะพบในสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ ในแหล่งน้ำนั้น ๆ ดังนั้นจึงเป็นการสมควรอย่างยิ่งที่จะมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ การสะสมและการถ่ายทอดปริมาณของโลหะหนักจากน้ำไปสู่สิ่งอื่น ๆ ในแหล่งน้ำ และจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กไปยังผู้บริโภคลำดับถัดไปในห่วงโซ่อาหาร เพื่อที่จะได้ข้อมูลในการทำนายปริมาณโลหะหนักที่จะพบได้ในสิ่งมีชีวิตอื่น ทั้งนี้ที่รู้ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

แพลงก์ตอนพืชชนิด *Chlorella* เป็นพืชเซลล์เดียวที่จัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว (unicellular green algae) ในดิวิชันคลอโรไฟตา (Division Chlorophyta) เซลล์มีลักษณะกลมหรือรูปร่างยาวรี ขนาด 2-10 ไมครอน มีคลอโรพลาสต์ 2 เม็ด โค้งชิดกับผนังเซลล์ คลอโรพลาสต์อาจมีรูปร่างแบนคล้ายถ้วยหรือแบบโค้งไปตามผนังเซลล์ ตามปกติจะไม่มีไพริโนยด์ และสติग्มา (ลัดดา, 2542)

Chlorella มีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยการสร้าง autospore ภายในเซลล์แม่ autospore มีจำนวนเป็น 2, 4, 8 หรือ 16 สปอร์ แต่ละสปอร์มีลักษณะเหมือนเซลล์แม่ทุกประการ ในบางครั้งเรียก สปอร์เหล่านี้ว่า aplanospore เมื่อ autospore หลุดจากเซลล์แม่ก็เจริญไปเป็นเซลล์ใหม่ต่อไป ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ *Chlorella* คือ อุณหภูมิ แสงสว่าง พีเอช ความชื้น และสารอาหาร โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญมักอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง และพีเอชที่เหมาะสมคือ 6.8

Chlorella เป็นแพลงก์ตอนพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีขนาดเล็ก เพาะเลี้ยงได้ง่าย จึงนิยมใช้เป็นอาหารของแพลงก์ตอนสัตว์หรือสัตว์น้ำวัยอ่อนที่กินแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหาร กลุ่มแพลงก์ตอนพืชจัดเป็นกลุ่มที่อยู่ระดับล่างสุดของห่วงโซ่อาหาร จัดเป็นผู้ผลิตขั้นต้นของแหล่งน้ำสำหรับแพลงก์ตอนพืชโดยทั่วไปพบว่าสามารถดูดซับแร่ธาตุ และโลหะหนักต่าง ๆ ได้เป็นปริมาณมาก ดังนั้นจึงย่อมมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตชั้นถัดไปที่กินแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหารโดยตรง

ไรแดงเป็นสัตว์น้ำพวกครัสตาเซียน (crustacean) กลุ่ม cladoceran ที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.4-1.8 มิลลิเมตร สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ตัวมีสีแดงเรื่อ ๆ ถ้าอยู่รวมกันจำนวนมากจะเห็นเป็นกลุ่มสีแดงชัดเจน โดยเฉพาะในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่น้อยไรแดงจะมีสีเข้มมาก จัดเป็นแพลงก์ตอน

สัตว์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง นิยมใช้เป็นอาหารสำหรับอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยเฉพาะสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เนื่องจากทำให้มีอัตราการรอดของสัตว์น้ำสูงกว่าอาหารสำเร็จรูป และสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ง่าย อาหารของไรแดงได้แก่ โปรโตซัว แพลงก์ตอนสัตว์ขนาดเล็ก แพลงก์ตอนพืช และอินทรีย์สารเน่าเปื่อย แต่อาหารที่นิยมใช้เพาะเลี้ยงไรแดงคือ *Chlorella* เนื่องจากเป็นอาหารที่ทำให้ได้ผลผลิตปริมาณมาก ไรแดงที่ได้มีความสะอาดและแข็งแรง (ภาณุ และ คณะ, 2532)

แพลงก์ตอนสัตว์ในกลุ่มไรน้ำ (cladoceran) เป็นแพลงก์ตอนสัตว์ที่นิยมใช้ในการทดสอบพิษเฉียบพลันและพิษเรื้อรังของสารพิษต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นสัตว์ที่ตอบสนองได้อย่างรวดเร็วต่อพิษเกือบทุกชนิด สามารถดูแลและเพาะเลี้ยงได้ง่าย และเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในห่วงโซ่อาหาร (Santojanni, 1998)

ปลาคุก เป็นปลาน้ำจืดไม่มีเกล็ด ลำตัวเรียวยาว ด้านข้างแบน หัวเล็ก กระโหลกท้ายทอยแหลม ครีบหุ้มมีก้านครีบแข็งปลายแหลมคม ขอบหยักเป็นฟันเลื่อยทั้งด้านในและด้านนอก มีอวัยวะพิเศษช่วยในการหายใจ อาหารของปลาคุกคือสัตว์ทั้งที่มีชีวิตและซากของสัตว์ ลำตัวเมื่อโตเต็มวัยยาวประมาณ 10-50 เซนติเมตร เป็นปลาที่เกษตรกรนิยมเลี้ยงและจัดเป็นปลาที่สำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง แหล่งที่อยู่ในธรรมชาติคือคูน้ำ หนองน้ำ และบึงซึ่งเป็นน้ำนิ่ง (กรมประมง, 2535)

วิธีการทดลอง

การเตรียมสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลอง

แพลงก์ตอนพืช (*Chlorella vulgaris*) : เพาะเลี้ยง *Chlorella* ด้วยวิธีปลอดเชื้อ aseptic technique ในห้องปฏิบัติการ ด้วยอาหารสูตร *Chlorella medium* (ัดดา, 2539) ในขวดแก้วความจุ 1 ลิตร ระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง $300 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ โดยให้แสงฟลูออเรสเซนต์ต่อเนื่องตลอดเวลา จนแพลงก์ตอนเข้าสู่ระยะปลาย exponential phase ทำการเก็บเซลล์โดยเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ระดับความเร็ว 3500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และทำการล้างด้วยน้ำ deionized 3 ครั้ง ก่อนนำไปใช้ต่อไป

แพลงก์ตอนสัตว์ ไรแดง (*Moina macrocopa*) : เลี้ยงไรแดงด้วย *Chlorella* ที่ได้จากห้องทดลอง ในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร ที่ระดับอุณหภูมิห้อง ได้รับแสงสว่างในรอบวันตามปกติ แต่ระดับความเข้มแสงที่ได้รับน้อยกว่าในธรรมชาติ โดยวางโหลเลี้ยงไรแดงในโรงเรือนที่มีหลังคา (ไม่มีผนังข้าง) การนำไรแดงไปใช้จะคัดเลือกเฉพาะไรแดงที่มีขนาดโตเต็มที่ โดยใช้ตาข่ายกรองที่มีขนาดใหญ่ เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการทดลองเนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันของไรแดง

ปลาฉลาม : นำปลาฉลามขนาดความยาวประมาณ 0.5-0.8 นิ้ว มาอนุบาลในบ่อซีเมนต์ ขนาดความจุ 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งตั้งภายในโรงเรือน ไม่ได้รับแสงแดดโดยตรง ให้ไรแดงที่เพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการเป็นอาหาร (ไรแดงในธรรมชาติอาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก) โดยให้อาหารประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปลา ให้ 2 มื้อต่อวัน เช้า 08.30 นาฬิกา และ เย็น 16.00 นาฬิกา (แบ่งเป็นมื้อละ 1.5 เปอร์เซ็นต์) โดยนำปลาฉลามมาอนุบาลในบ่ออย่างน้อย 1 เดือนก่อนนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ปลาหมักเป็นสิ่งมีชีวิตที่อยู่ชั้นบนสุดในห่วงโซ่อาหารในน้ำ ซึ่งมักจะสะสมโลหะที่เป็นพิษต่าง ๆ ในน้ำไว้ได้มาก ปริมาณการสะสมขึ้นอยู่กับการนำเข้าภายในร่างกายหรือกลไกในการกำจัดของสัตว์น้ำแต่ละชนิด (Mansour, 2002) ระดับความเป็นพิษจะขึ้นกับความเข้มข้นของพิษต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ สำหรับแคดเมียมที่มีผลต่อปลาคือทำลายไตและเป็นสาเหตุเรื้อรังทำให้ไตปลาทำงานผิดปกติ การสืบพันธุ์ผิดปกติ กล้ามเนื้อตึงและก่อให้เกิดมะเร็ง (Luckey, 1977)

ขั้นที่ 1 ศึกษาความเป็นพิษของแคดเมียม LC_{50} ต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมโดยการละลาย $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ในน้ำ Deionized water ที่ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-7 ซึ่งเป็นระดับที่แคดเมียมละลายอยู่ในรูป Cd^{2+} ได้ดี (รูปที่เป็นพิษ) และเป็นระดับของพีเอชในน้ำธรรมชาติ
- 1.2 ใส่แพลงก์ตอนพืช *Chlorella* จำนวน 1 กรัมต่อลิตร ใน polypropylene beaker ขนาด 1 ลิตร ไรแดง 30 ตัวต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ใน polypropylene beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร และใส่ปลาฉลาม 10 ตัว ต่อน้ำ 3 ลิตร ลงในตู้ acrylic โดยทุกภาชนะทดลองบรรจุโลหะหนักที่มีความเข้มข้น

แตกต่างกันในช่วง 0.5- 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ละชุดทำการทดลอง 6 ซ้ำ (ชุดทดลองไรแดง ทำ 10 ซ้ำ) ทุกชุดการทดลองตั้งไว้ในที่ระดับอุณหภูมิห้อง ได้รับแสงมีดต่อสว่าง เป็น 12 ต่อ 12 ชั่วโมง และไม่มีการให้อาหารตลอดการทดลอง โดยจำนวนปลาทุกที่ใช้ 10 ตัวต่อน้ำ 3 ลิตร นั้นเพื่อไม่ปลาคูกหนาแน่นมากเกินไป ซึ่งจะป้องกันการเกิดความเครียดและการทำร้ายกันเองของปลาได้ จากนั้นทดสอบหาความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมที่ทำให้สิ่งมีชีวิตที่ทดลองตาย 50 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีชุดควบคุมคือชุดที่ใส่สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในน้ำ deionized ที่ปรับระดับพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-7

- 1.3 ตรวจสอบจำนวนแพลงก์ตอนสัตว์และปลาที่ตายที่ระยะเวลาต่าง ๆ จนครบ 48 ชม. ตรวจดูลักษณะเซลล์ของ *Chlorella* และตรวจวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ที่เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง
- 1.4 ตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในสารละลายของทุกชุดการทดลองที่เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง และตรวจวัดค่าพีเอชทุกวัน
- 1.5 เลือกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหมาะสมไม่ทำให้สัตว์ทดลองตายใช้ในการทดลองขั้นถัดไป

ขั้นที่ 2 ศึกษาสัดส่วนการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ

- 2.1 ศึกษาการสะสมของแคดเมียมในดินตะกอน โดยนำดินที่ปราศจากแคดเมียม ซึ่งเตรียมโดยนำดินจากแหล่งน้ำธรรมชาติมาทำความสะอาดเพื่อกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนโดยแช่ในกรด HNO_3 0.2 N และล้างด้วยน้ำ Deionized ประมาณ 3 ครั้ง จากนั้นวัดค่าพีเอชของดิน ถ้ามีค่าเป็นกรดมากให้ทำการปรับด้วยการเติมสารละลาย NaOH 0.03 N จนได้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6-7 และทำการล้างให้สะอาดด้วยน้ำ Deionized อีกครั้ง และนำดินไปสกัดและวัดปริมาณแคดเมียมก่อนทดลองจนแน่ใจว่าไม่มีปริมาณแคดเมียมปนอยู่ในดิน และนำดินใส่ในตู้ acrylic ฟุ้งลมในที่ร่มจนแห้ง แต่ต้องระวังไม่ให้แห้งจนมีรอยแยกระหว่างดิน หรือระหว่างขอบตู้ทดลองกับดินซึ่งจะทำให้เกิดการผิดพลาดในการทดลองได้ จากนั้นใส่สารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลองในขั้นที่ 1 ปริมาตร 1.5 ลิตร วางตู้ทดลองที่ระดับอุณหภูมิห้อง ปิดตู้ทดลองด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในสารละลายที่เวลา 0, 0.5, 1, 3, 6, 24, 48, และ 72 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง แยกดินออกเป็นส่วน ๆ ตามระดับความสูงคือ 0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8, และ 8-10 เซนติเมตร นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง (หรือจนน้ำหนักแห้งคงที่) นำดินในแต่ละระดับความสูงมาบดละเอียดและนำมาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดิน โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ และมีชุดควบคุมคือชุดที่ใส่เฉพาะสารละลายแคดเมียมในตู้ทดลอง

- 2.2 ศึกษาการสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช โดยใช้ *Chlorella* จำนวน 10 กรัมต่อสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ใน polypropylene beaker ขนาด 1 ลิตร ปิดภาชนะทดลองด้วยพลาสติกใส ตั้งไว้ที่ระดับอุณหภูมิห้อง ได้รับช่วงแสงตามธรรมชาติ ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าฟิโอะ และตรวจวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลาย เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 72 ชั่วโมง แยก *Chlorella* ออกจากสารละลายแคดเมียมโดยวิธี centrifuge ที่ความเร็ว 3500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชม. และนำมาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมที่ *Chlorella* โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ มีชุดควบคุมคือชุดที่ใส่เฉพาะสารละลายแคดเมียมในภาชนะทดลอง
- 2.3 ศึกษาการสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนสัตว์ โดยใช้ไรแดง 2 กรัม ในโหลทดลองที่บรรจุสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ปิดโหลด้วยพลาสติกใส ตั้งโหลทดลองที่ระดับอุณหภูมิห้อง วัดการเปลี่ยนแปลงค่าฟิโอะ และวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลาย เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 72 ชั่วโมง แยกไรแดงออกจากสารละลายแคดเมียม นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชม. และนำมาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมที่ไรแดง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ มีชุดควบคุมคือชุดที่ใส่เฉพาะสารละลายแคดเมียมในภาชนะทดลอง
- 2.4 ศึกษาการสะสมของแคดเมียมในปลาฉลาม โดยใช้ปลาฉลามซึ่งมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.4045 ± 0.58 กรัม ความยาวเฉลี่ย 5.55 ± 0.62 เซนติเมตร จำนวน 10 ตัว ในตู้ acrylic ซึ่งบรรจุสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 3 ลิตร ปิดตู้ทดลองด้วยพลาสติกใส ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าฟิโอะ และปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลาย เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 72 ชั่วโมง แยกปลาฉลามออกจากสารละลายแคดเมียม นำส่วนเนื้อมาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสม สกัดเนื้อปลาสดไม่อบแห้ง เนื่องจากประชาชนนิยมนำปลาสดมาทำอาหารบริโภค (น้ำหนักสด 1 กรัม เท่ากับน้ำหนักแห้ง 0.192 ± 0.015 กรัม (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, จำนวนซ้ำเท่ากับ 30)) โดยแยกสกัดในส่วนของปลาฉลามที่ตายระหว่างทดลอง และปลาฉลามที่ไม่ตายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ มีชุดควบคุมคือชุดที่ใส่เฉพาะสารละลายแคดเมียมในภาชนะทดลอง
- 2.5 ศึกษาการสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา โดยใช้ *Chlorella* 15 กรัม ไรแดง 15 กรัม และปลาฉลาม 5 ตัว ลงในโหลทดลอง acrylic ซึ่งบรรจุสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.5 ลิตร โดยมีการกั้นตู้ทดลองออกเป็นสามส่วนเพื่อแยกใส่ *Chlorella* ไรแดง และปลาฉลาม ออกจากกัน เพื่อกันการกินกันเป็นอาหาร โดยใช้กระดวยกรองขนาดช่องตา 1.2 ไมโครเมตร เป็นวัสดุในการกั้นตู้ทดลองออกเป็นสามส่วน ๆ วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าฟิโอะและปริมาณแคดเมียมในสาร

ละลายทุกวันจนสิ้นสุดการทดลอง ที่ 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นแยก *Chlorella* และ ไรแดงออกจากโหลทดลอง นำไปอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และสกัดหาปริมาณแคดเมียม ส่วนปลาถูกแยกเฉพาะส่วนเพื่อนำมาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในเนื้อปลาสด ชุดควบคุมคือชุดที่มีเฉพาะสารละลายแคดเมียมและก้นตู้ทดลองด้วยกระดาษกรอง

- 2.6 ศึกษาการสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดิน โดยใช้ *Chlorella* 15 กรัม ไรแดง 15 กรัม ปลา 5 ตัว และดินสูง 10 เซนติเมตร ในโหลทดลอง acrylic ซึ่งบรรจุสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.5 ลิตร โดยใส่ดินไว้ก่อนเป็นอันดับแรก และเมื่อดินแห้งจึงใส่สารละลายแคดเมียมและสิ่งมีชีวิตที่ต้องการทดลองลงไปทันที โดยมีการก้นตู้ทดลองออกเป็นสามส่วนเหนือผิวดิน เพื่อแยกใส่ *Chlorella* ไรแดง และปลาคู ออกจากกัน เพื่อกันการกินกันเป็นอาหาร โดยใช้กระดาษกรองขนาดตา 1.2 ไมโครเมตร เป็นวัสดุในการก้นตู้ทดลองออกเป็นส่วน ๆ วัดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลาย เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 72 ชั่วโมง แยก *Chlorella* ไรแดง ปลา และดิน ออกจากสารละลายแคดเมียม นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24/48 ชม. และนำมาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมที่สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ (ทำการทดลอง 3 ชุด) ชุดควบคุมคือชุดที่มีเฉพาะสารละลายแคดเมียมและก้นตู้ทดลองด้วยกระดาษกรอง

ขั้นที่ 3 ศึกษาการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมในห่วงโซ่อาหาร

- 3.1 ใส่ *Chlorella* จำนวน 10 กรัม ในสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ใน polypropylene beaker เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง แยกเซลล์ *Chlorella* ออกจากสารละลายแคดเมียม นำบางส่วนไปอบแห้งและสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมที่เซลล์ *Chlorella* อีกส่วนนำไปใช้เลี้ยงไรแดง
- 3.2 เลี้ยงไรแดงด้วยน้ำสะอาดในตู้ทดลอง (ตรวจวัดปริมาณแคดเมียมที่อาจปนเปื้อนในไรแดง ก่อนทดลอง) นำ *Chlorella* จากขั้น 3.1 มาเป็นอาหารไรแดง โดยใช้ *Chlorella* 10 กรัม ใส่ในน้ำปริมาตร 1 ลิตร และใส่ไรแดงที่แข็งแรงจำนวน 10 กรัม ลงในโหลทดลอง เลี้ยงไรแดงประมาณ 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงเก็บเกี่ยวผลผลิตไรแดงทั้งหมด นำไรแดงบางส่วนไปสกัดวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในไรแดง และนำไรแดงที่เหลือไปเป็นอาหารปลาคู
- 3.3 เลี้ยงปลาคูจำนวน 35 ตัวในน้ำสะอาดในตู้ทดลองขนาดความจุ 20 ลิตร ให้ไรแดงที่ได้จากขั้นที่ 3.2 เป็นอาหาร โดยให้อาหารสองมือ เช้าและเย็น ให้อาหารมือละ 1.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปลา ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำและเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกสัปดาห์ จนสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลาสองเดือน โดยระหว่างการเลี้ยงมีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในน้ำที่เลี้ยงปลา และแคดเมียมที่สะสมในเนื้อปลาที่ระยะเวลา 0, 3, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 และ 60

วันของการเลี้ยง โดยมีชุดควบคุมคือชุดที่ใช้ไรแดงที่ไม่มีแคดเมียมปนเปื้อนเป็นอาหาร (ไรแดงที่กิน *Chlorella* ปกติไม่ผ่านการสัมผัสแคดเมียม)

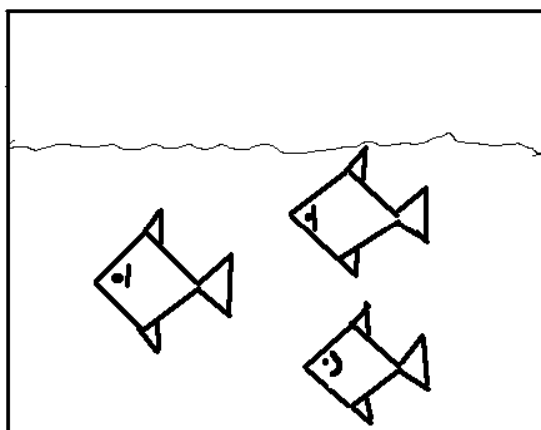
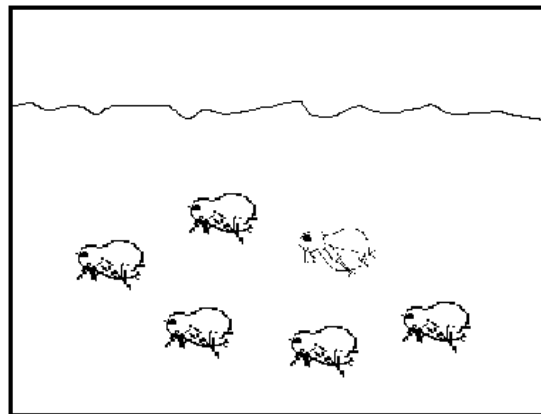
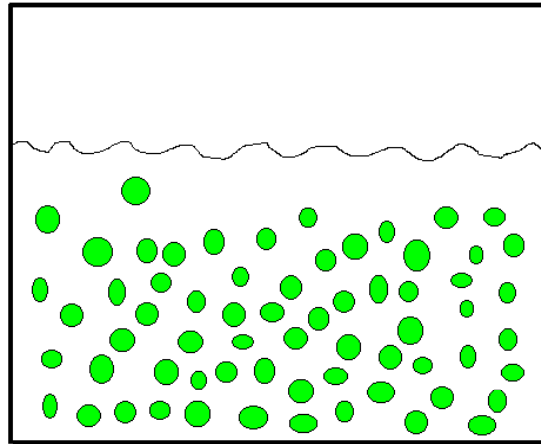
การวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่าง

การวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่าง *Chlorella* ไรแดง ปลา ใช้วิธีการสกัดตาม AOAC (1995) (Association of Official Analytical Chemists) และดิน ใช้วิธีการสกัดด้วย HNO_3 และ H_2O_2 และนำไปตรวจวัดปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (GBC AVANTA) ด้วยวิธี flame technique ซึ่งมี sensitivity ต่ำที่สุดคือ 9 ppb และวิธี graphite furnace ซึ่งมี sensitivity ต่ำที่สุดคือ 1 ppb การนำสารละลายตัวอย่างไปวัดปริมาณแคดเมียมต้องกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน ทำการเก็บรักษาด้วยกรด HNO_3 และควรนำไปตรวจวัดทันที ถ้ายังไม่สามารถวัดได้ให้เก็บไว้ในตู้เย็นแต่ไม่ควรเกิน 3 วัน

การสกัดแคดเมียมใน *Chlorella* ไรแดง และดิน จะต้องอบแห้งก่อนสกัดเพื่อทราบน้ำหนักที่แน่นอนของแคดเมียมที่สะสม ต่อมน้ำหนักที่แน่นอนของสิ่งเหล่านี้ ส่วนในปลาคุณนั้นแยกเฉพาะส่วนเนื้อมาสกัดเนื่องจากเป็นส่วนที่ประชาชนใช้ในการบริโภค ส่วนอวัยวะภายในนั้นปกติแล้วมีรายงานว่าการสะสมของปริมาณโลหะหนักมากที่สุดเมื่อเทียบกับอวัยวะส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย แต่การทดลองนี้เน้นศึกษาส่วนที่มนุษย์บริโภคเท่านั้น นอกจากนี้การสกัดแคดเมียมจากเนื้อปลานั้นสกัดในรูปเนื้อปลาสด เพื่อที่จะสามารถคาดการณ์หรือทำนายได้ง่ายว่าถ้าเนื้อปลาน้ำหนักเท่านี้จะมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในปริมาณเท่าใด

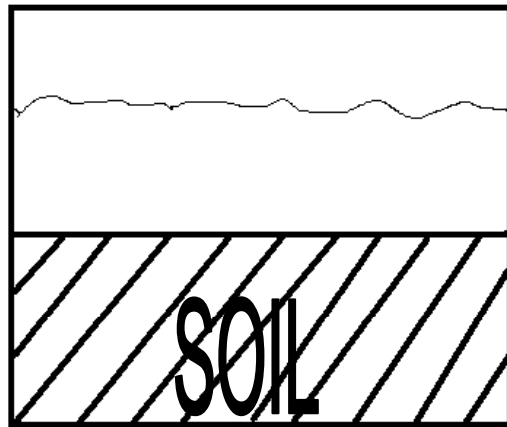
สรุปขอบเขตการศึกษา

ขั้นที่ 1 ศึกษาระดับความเป็นพิษของแคดเมียม LC_{50} ต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลอง

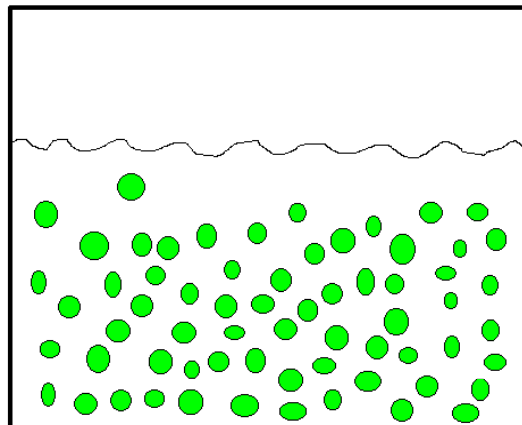


ขั้นที่ 2 ศึกษาสัดส่วนการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ

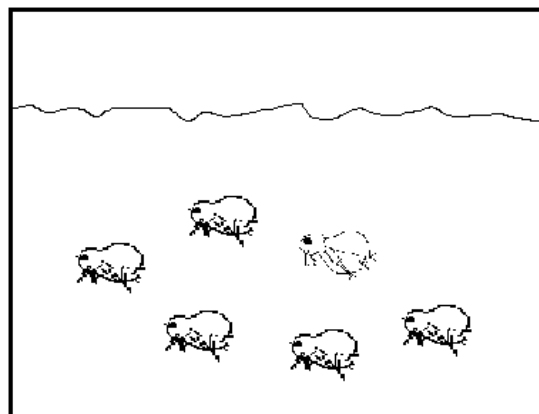
ขั้นที่ 2.1 ดินตะกอนสัมผัสสารละลายแคดเมียม



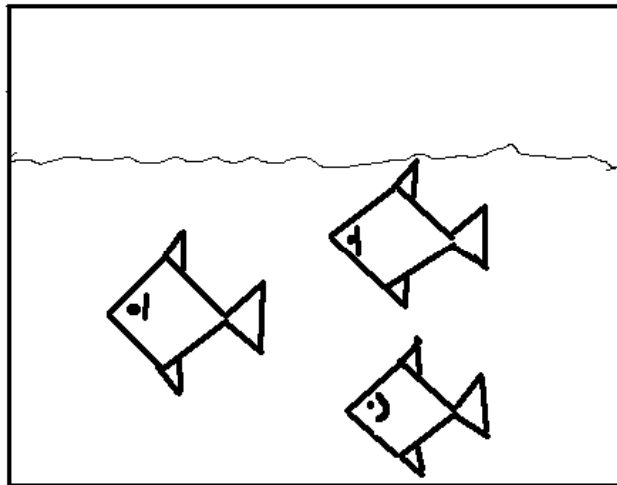
ขั้นที่ 2.2 แพลงก์ตอนพืช *Chlorella* สัมผัสสารละลายแคดเมียม



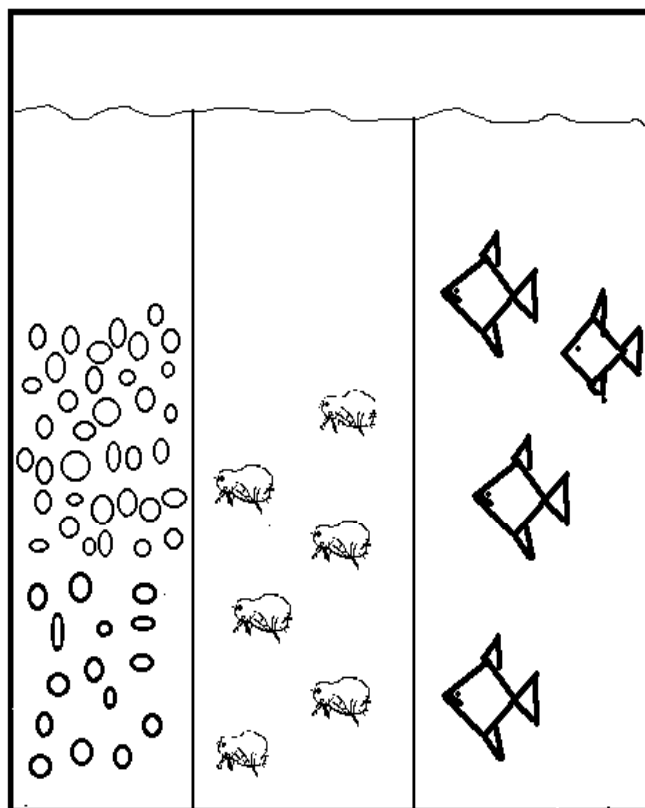
ขั้นที่ 2.3 แพลงก์ตอนสัตว์ ไรแดง สัมผัสสารละลายแคดเมียม



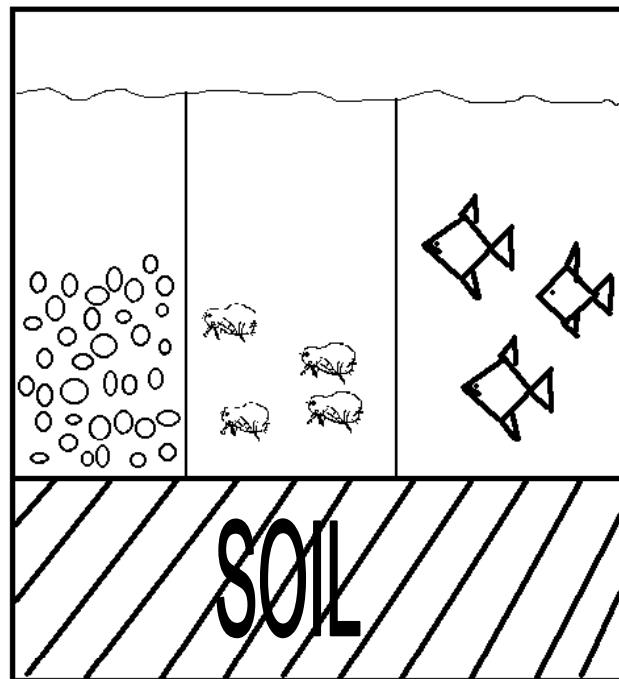
ขั้นที่ 2.4 ปลาตัวผู้ผสมพันธุ์และวางไข่



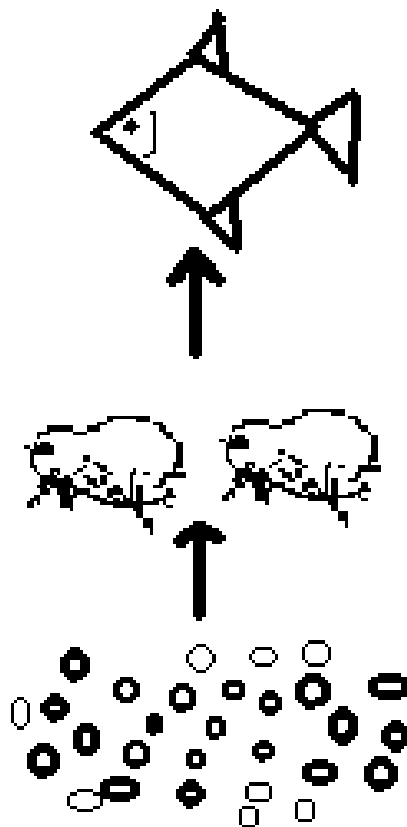
ขั้นที่ 2.5 *Chlorella* ไ้แดง และ ปลา ตัวผู้ผสมพันธุ์และวางไข่



ขั้นที่ 2.6 *Chlorella* ไรแดง ปลา และดินตะกอน สัมผัสสารละลายแคดเมียม



ขั้นที่ 3 ศึกษาการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมในห่วงโซ่อาหาร



ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ขั้นที่ 1 ระดับความเป็นพิษของแคดเมียม (LC_{50}) ต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองหาค่า LC_{50} ของไรแดงโดยทำการทดลองในช่วงความเข้มข้นของแคดเมียม 0-5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าไรแดงมีค่า LC_{50} ที่ 48 ชั่วโมง เท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 1) โดยค่าพีเอชตลอดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 6.33-6.82 ซึ่งเป็นค่าที่สารละลายแคดเมียมไม่ตกตะกอน และเป็นค่าที่ไม่มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของไรแดง

ตารางที่ 1 ปริมาณไรแดงที่ตายที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ในความเข้มข้นของแคดเมียมที่แตกต่างกัน (จำนวนไรแดงเท่ากับ 30 ตัวต่อซ้ำ ทดลอง 9 ซ้ำ)

Cd (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนไรแดงที่ตาย (ตัว)
0	3.00 ± 1.73
0.03	7.33 ± 2.51
0.05	8.33 ± 2.08
0.07	9.33 ± 2.51
0.09	11.33 ± 1.15
0.1	15.00 ± 2.64
0.25	26.67 ± 1.52
0.5	28.33 ± 1.53
1	30 ± 0
2	30 ± 0
3	30 ± 0
4	30 ± 0
5	30 ± 0

ระดับความเป็นพิษของแคดเมียมที่มีต่อไรแดง (*Moina macrocopa*) โดยทำให้ไรแดงตาย 50 เปอร์เซ็นต์จากการทดลองนี้คือ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็นระดับที่ต่ำกว่าของไรน้ำชนิด *Daphnia magna* จากการศึกษาของ Bodar (1990) ซึ่งมีค่า LC_{50} ที่ 96 ชั่วโมง คือ 262 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Semsari (2002) ที่ทดลองที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ (ตารางที่ 2) ซึ่งแสดงว่าการที่ไรแดงจะมีความทนทานต่อพิษของแคดเมียมได้เท่าใดขึ้นกับปัจจัยด้านอุณหภูมิด้วย ไรแดงมีค่า LC_{50} ต่ำกว่ากลุ่มของโคฟีพอดหลายชนิด แต่สามารถทนทานได้มากกว่าโคฟีพอดหรือครัสตา

เชื้อซึ่งอยู่ในระยะวัยอ่อน ไรแดงที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถใช้เป็นตัวทดสอบพิษของแคดเมียมได้ดีเนื่องจากสามารถตอบสนองต่อพิษแคดเมียมได้ไวแม้ความเข้มข้นต่ำ และจะยังเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวทดสอบพิษได้ดีขึ้นถ้าใช้ไรแดงหรือแพลงก์ตอนสัตว์ทดลองที่อยู่ในระยะวัยอ่อน (Sobral et al., 2001) แต่เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการศึกษากับไรแดงขนาดตัวเต็มวัยที่นิยมใช้เป็นอาหารสัตว์น้ำจึงทำให้มีความทนทานต่อพิษของแคดเมียมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับระยะวัยอ่อนของสัตว์ชนิดอื่น

นอกจากอุณหภูมิแล้วปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นพิษของโลหะหนักหรือระดับของค่า LC_{50} ต่อสัตว์ทดลองคือความเค็ม (Hall et al., 1995) ความเป็นกรดเป็นด่าง (Penttinen, 1995) โดยที่สภาวะที่เป็นกรดโลหะหนักจะเป็นพิษต่อสัตว์ทดลองมากขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่า LC_{50} (ไมโครกรัมต่อลิตร) ของไรแดงกับแพลงก์ตอนสัตว์ชนิดอื่น ๆ

ชนิด	ระยะ	แคดเมียม (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อ้างอิง
Marine copepod				
<i>Tigriopus brevicornis</i>	Nauplii	17.4	96	Forget (1998)
	Copepodids	29.7	96	Forget (1998)
	Ovigerous female	47.9	96	Forget (1998)
	nauplii	78	96	Le Dean (1987)
<i>Tisbe battagliai</i>	Adult	460	96	Hutchinson(1994)
	Nauplii	340	96	Hutchinson(1994)
<i>Eurytemora affinis</i>	nauplii			
5 ppt		51.6	96	Hall et al. (1995)
15 ppt		213.2	96	Hall et al. (1995)
25 ppt		82.9	96	Hall et al. (1995)
Estuarine copepods				
<i>Eurytemora affinis</i>	-	147.7	96	McHenery (1991)
<i>Acartia tonsa</i>	-	90	96	
Freshwater copepod				
<i>Diaptomus forbesi</i>	-	10200	96	Dutta (2001)
Marine Crustaceans				
<i>Homarus americanus</i>	Larvae	78	96	Jonhson (1979)
<i>Mysidopsis bahia</i>	Larvae	19.6	96	Cripe (1994)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชนิด	ระยะ	แคะเมียม (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อ้างอิง
	Juvenile	39.5	96	Birmelin (1995)
<i>Syriella armata</i>	Juvenile	19.6	96	Cripe (1994)
<i>Cancer magister</i>	Zoe	247	96	McHenery (1991)
<i>Penaeus japonicus</i>	Zoe	10-30	96	Bambang (1994)
<i>Penaeus penicillatus</i>	Nauplii	35-65	96	Munshi (1996)
Marine amphipods				
<i>Elasmopus rapax</i>	-	179.8	96	Zanders (1992)
Freshwater crustaceans				
<i>Daphnia magna</i>	-	262	48	Bodar (1990)
<i>Daphnia magna</i>	-			
5 °C		35/3	24/48	Semsari (2002)
10 °C		50/7	24/48	Semsari (2002)
20 °C		65/5	24/48	Semsari (2002)
30 °C		20/1.6	24/48	Semsari (2002)
<i>Moina macrocopa</i>	adult	100	48	การทดลองนี้

หมายเหตุ - คือไม่ได้ระบุอายุหรือระยะของสัตว์ทดลอง

ค่า LC₅₀ ของปลาฉก ซึ่งทำการทดลองในสารละลายแคะเมียมเข้มข้น 0-5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าค่า LC₅₀ ที่ 48 ชั่วโมงของปลาฉกคือ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 3) โดยปลาที่ใช้ทดลองมีความยาวเฉลี่ย 4.13 ± 1.4 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ย 7.35 ± 0.87 กรัม และค่าพีเอชระหว่างทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 6.25-6.86 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เป็นอันตรายต่อปลาฉก

ในการทดลองนี้ปลาได้รับพิษของแคะเมียมจากน้ำโดยตรง แคะเมียมจะเข้าสู่ตัวปลาได้ทั้งทางผิวหนังและทางเหงือก โดยทั่วไปปลามีความสามารถในการลดพิษของโลหะหนักได้โดยใช้แร่ธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียมที่บริเวณเหงือกเป็นกลไกลดปริมาณโลหะหนักให้เข้าสู่เหงือกได้น้อยลง จึงได้รับพิษของโลหะหนักน้อยลง (Hollis et al., 2000) จากการศึกษาที่ค่า LC₅₀ ของปลาฉกค่อนข้างสูงกว่าของปลา *Cyprinodon variegatus* ซึ่ง Hall และคณะ (1995) ได้ทดลองหาค่า LC₅₀ ที่ 96 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบที่ระดับความเค็ม 3 ระดับคือ 5, 15 และ 25 พีพีที พบว่ามีค่า LC₅₀ เท่ากับ 0.180, 0.312 และ 0.495 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่เมื่อเทียบกับค่า LC₅₀ ที่ 96 ชั่วโมงของ

Labeo rohita ซึ่งมีค่าเท่ากับ 89.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Dutta and Kaviraj, 2001) แล้วถือว่าปลาคูมีค่าต่ำกว่ามาก นั้นแสดงว่าปลาคูสามารถตอบสนองต่อพิษของแคดเมียมได้เร็วกว่าและดีกว่า

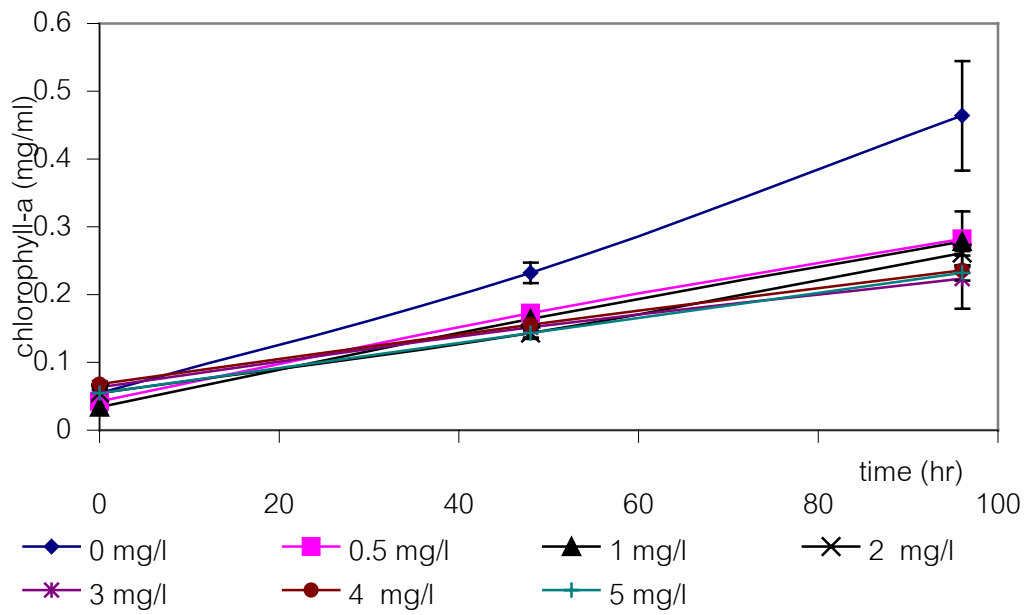
ตารางที่ 3 ปริมาณปลาคูที่ตายที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ในสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (จำนวนปลาเท่ากับ 10 ตัวต่อซ้ำ ทดลอง 6 ซ้ำ)

Cd (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนปลาคูตาย (ตัว)
0	0
1	0.33 ± 0.58
3	1 ± 0.38
3.25	1 ± 0.57
3.5	5.33 ± 1.52
3.75	5.6 ± 2
4	5.67 ± 1.2
4.25	6.3 ± 3.05
4.5	8 ± 2.65
5	6 ± 2.65

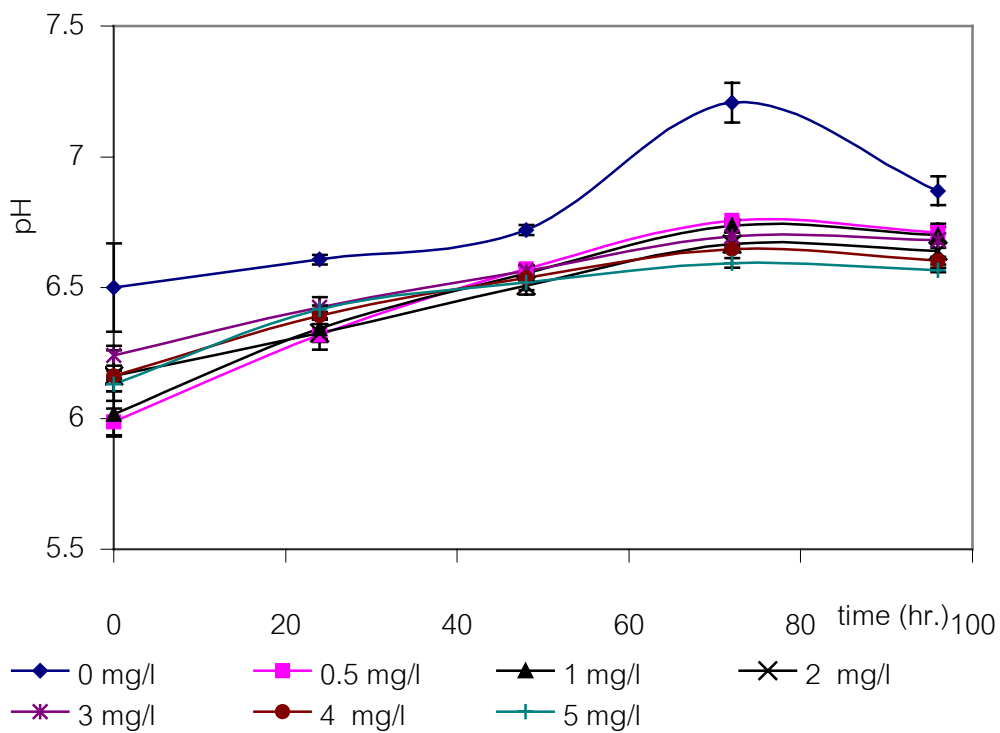
การทดลองใส่ *Chlorella* ลงในสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0-5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่สิ้นสุดการทดลอง 96 ชั่วโมง แคดเมียมที่ความเข้มข้นสูงสุดในการทดลองนี้ยังไม่ทำให้ *Chlorella* ตาย โดยปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ของ *Chlorella* เพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง (ภาพที่ 1) และลักษณะเซลล์ของ *Chlorella* ที่ส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า ยังมีสภาพปกติ ไม่ถูกทำลายแต่พบว่าในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ สูงกว่าชุดที่มีแคดเมียมและเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มมากขึ้นปริมาณคลอโรฟิลล์จะยิ่งลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชพบว่าในชุดควบคุมมีค่าพีเอชสูงที่สุด ส่วนในชุดที่มีแคดเมียมจะมีค่าพีเอชต่ำกว่าและมีแนวโน้มว่าเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นค่าพีเอชจะเพิ่มมากขึ้น และที่ความเข้มข้นของแคดเมียมสูง ๆ ค่าพีเอชจะยิ่งต่ำลง (ภาพที่ 2) ซึ่งแสดงว่าแคดเมียมมีผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสงของ *Chlorella* จึงทำให้มีค่าพีเอชต่ำกว่าชุดควบคุมซึ่งการสังเคราะห์แสงเกิดได้ดีกว่า มีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้มากกว่าจึงทำให้พีเอชมีค่าสูง

Kaplan (1995) ได้รายงานถึงพิษของแคดเมียมต่อ *Chlorella* sp. ว่าแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 ไมโครโมล *Chlorella* จะถูกยับยั้งการเจริญเติบโตอย่างรุนแรงและค่า LD₅₀ ของ *Chlorella* คือ 3 ไมโครโมล การที่ *Chlorella* สามารถทนต่อพิษของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้ เนื่องจาก *Chlorella* สามารถดูดซับโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์และขับสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ออกมาจับกับโลหะหนักเพื่อลดพิษของโลหะหนักลง และภายในเซลล์ *Chlorella* เองยังสามารถสร้างตัวดักจับโลหะหนักให้ตกตะกอนได้อีกด้วย

ปฏิกิริยาโดยทั่วไปของสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสกับโลหะหนักคือจะสังเคราะห์โปรตีนที่ทำหน้าที่จับโลหะหนักขึ้นในเซลล์เพื่อลดพิษของโลหะหนัก ซึ่งโปรตีนที่สังเคราะห์ในพืชหรือใน *Chlorella* จะต่างกับที่สังเคราะห์ในสัตว์คือจะมีน้ำหนักเบาและมีประจุลบมากกว่า ดังนั้นในการทดลองนี้ *Chlorella* จึงสามารถทนทานต่อพิษของแคดเมียมได้ดี แคดเมียมที่ความเข้มข้นสูงไม่สามารถทำให้ *Chlorella* ตายได้ เพียงแต่ลดปริมาณคลอโรฟิลล์ลง ซึ่งอาจทำให้การเจริญเติบโตลดลง (Kaplan, 1995)



ภาพที่ 1 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของ *Chlorella* ที่สัมผัสสารละลายเคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



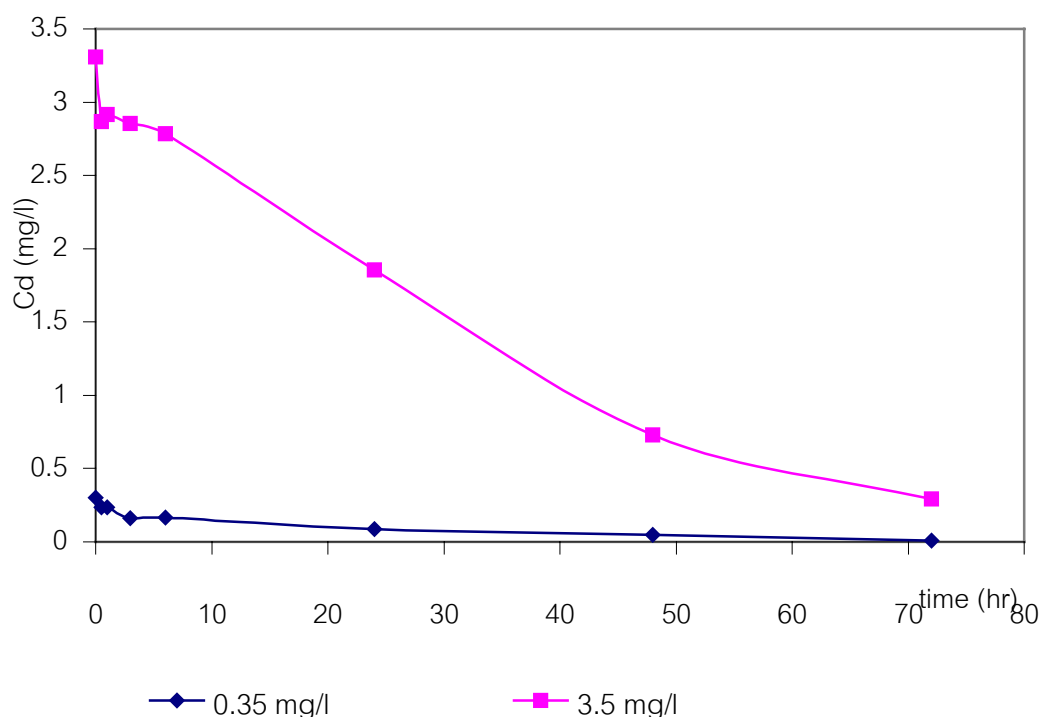
ภาพที่ 2 ค่าพีเอชในการหาค่า LC50 ของ *Chlorella* ที่ระดับเคดเมียมความเข้มข้นต่าง ๆ

ขั้นที่ 2 สัดส่วนการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ

2.1 การสะสมของแคดเมียมในดินตะกอน

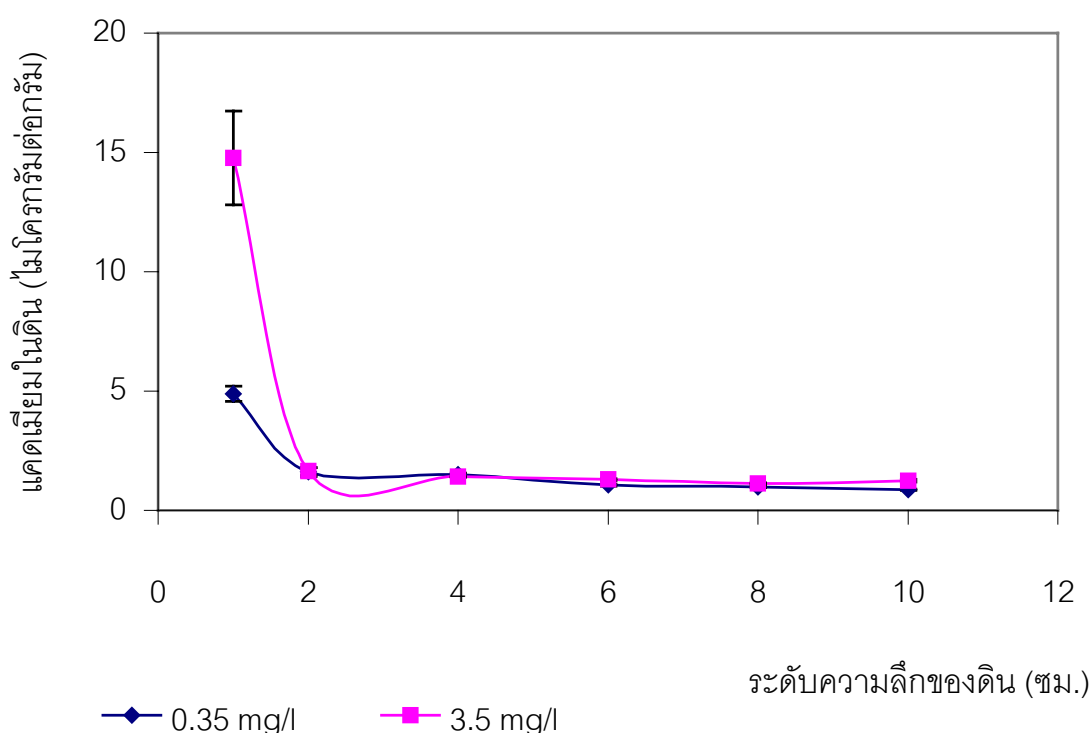
จากการทดลองในขั้นที่ 1 ค่า LC_{50} ที่ 48 ชั่วโมงของปลาชุกคือ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นค่าแคดเมียมที่ปลอดภัยไม่ทำอันตรายต่อปลาชุก (safety) จะมีค่าประมาณ 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาการถ่ายทอดของแคดเมียมจากน้ำสู่ดินที่ระดับความเข้มข้นของการทดลองสองระดับคือ 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และลดลงเรื่อย ๆ ตลอดการทดลอง (ภาพที่ 3) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณแคดเมียมในชุดการทดลองที่มีค่าแคดเมียมเข้มข้นเริ่มต้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นลดลงไปถึง 96.59 % ส่วนชุดที่แคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงไป 91.10 %

แสดงว่าดินมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ดี เนื่องจากดินตะกอนนั้นมีลักษณะผิวดินเป็นประจุลบซึ่งสามารถดูดซับประจุบวกได้ ดังนั้นการทดลองนี้แคดเมียมจึงถูกดินตะกอนดูดซับไว้ได้เป็นปริมาณมาก และดูดซับได้อย่างรวดเร็ว โดยพบว่าเมื่อปริมาณแคดเมียมในน้ำเพิ่มมากขึ้น ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินจะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 3 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในน้ำหลังจากสัมผัสกับดิน

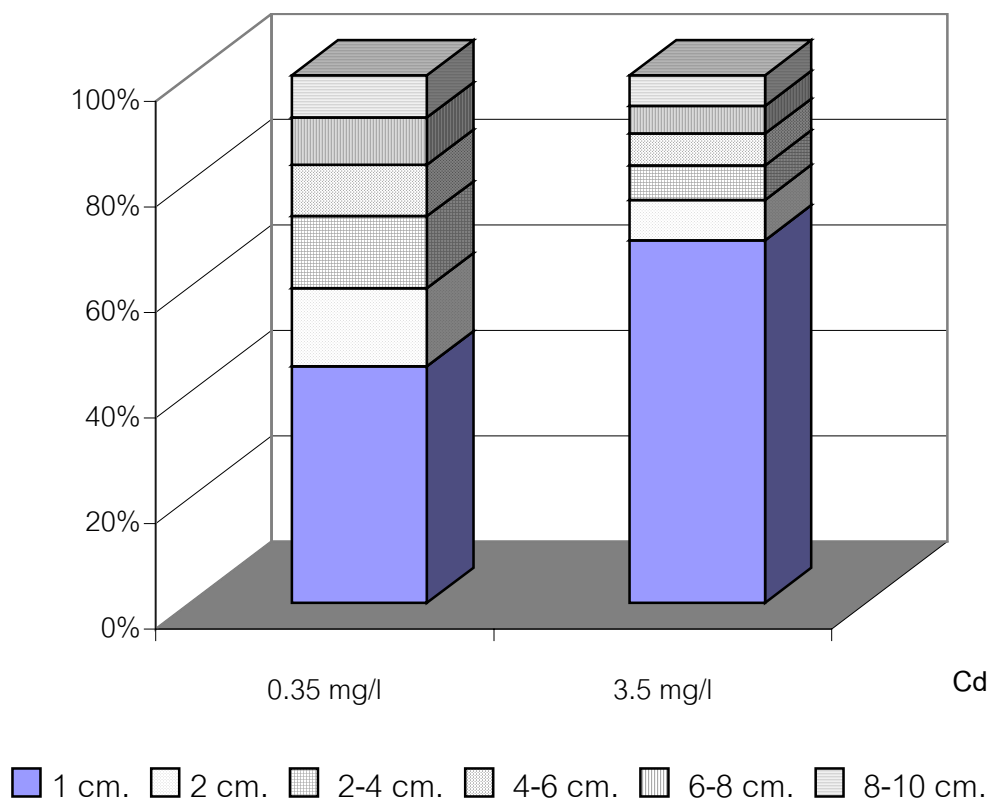
เมื่อนำดินที่ระดับความสูงต่าง ๆ มาสกัดพบว่าแคดเมียมมีการสะสมที่ระดับผิวดินมากที่สุด และเมื่อระดับความลึกเพิ่มมากขึ้นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินนั้นลดลง (ภาพที่ 4) โดยชุดการทดลองแคดเมียม 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นที่ระดับความลึก 1 ซม. มีปริมาณแคดเมียมในดินเฉลี่ย 4.89 ± 0.31 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ที่ระดับ 10 ซม. มีค่า 0.87 ± 0.02 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนในชุดการทดลองแคดเมียม 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นที่ระดับความลึก 1 ซม. มีปริมาณแคดเมียมในดินเฉลี่ย 14.75 ± 1.96 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่ระดับ 10 ซม. มีค่า 1.24 ± 0.07 ไมโครกรัมต่อกรัม (ตารางผนวกที่ 1)



ภาพที่ 4 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ

การที่ดินบริเวณผิวที่สัมผัสกับน้ำมีปริมาณแคดเมียมสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่สามารถสัมผัสกับแคดเมียมโดยตรงจึงดูดซับแคดเมียมได้เต็มที่ แคดเมียมส่วนที่เหลือที่ซึ่งผิวดินไม่สามารถดูดซับได้ทันจะซึมลงสู่ระดับที่ลึกมากขึ้นและมีปริมาณแคดเมียมลดลงเรื่อย ๆ ตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น และจากการทดลองนี้พบว่าที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง แคดเมียมสามารถซึมลงจนถึงระดับลึกที่สุดของดินที่ใช้ในการทดลองคือ 10 เซนติเมตร

เมื่อเทียบสัดส่วนเป็นร้อยละของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินตะกอนระดับความลึกต่าง ๆ พบว่าที่ระดับจากผิวดินถึงลึก 1 เซนติเมตร มีปริมาณแคดเมียมอยู่ถึง 44.8 เปอร์เซ็นต์ ในชุดทดลองที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 5) จากนั้นเปอร์เซ็นต์การสะสมจะลดลงและที่ระดับความลึก 8-10 เซนติเมตร มีปริมาณแคดเมียมอยู่เพียง 7.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในชุดทดลองที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้น ที่ระดับผิวดินถึงระดับความลึก 1 เซนติเมตร มีการสะสมของแคดเมียมมากถึง 68.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับความลึกที่เหลือคือตั้งแต่ 2-10 เซนติเมตรมีสัดส่วนการสะสมอยู่ในปริมาณใกล้เคียงกันคือ 5.5-7.6 เปอร์เซ็นต์

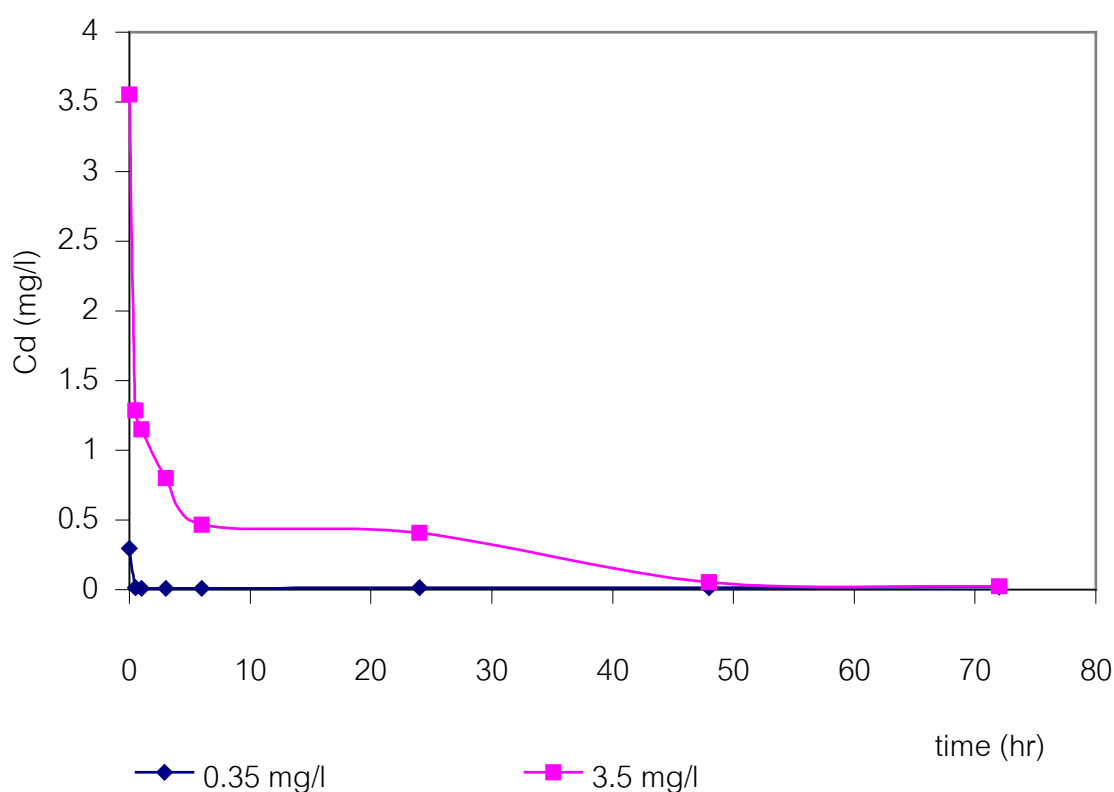


ภาพที่ 5 ร้อยละของแคดเมียมที่แพร่กระจายในระดับความลึกต่าง ๆ
ชุดทดลองที่ดินสัมผัสแคดเมียมโดยตรง

2.2 การสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช

การศึกษาการถ่ายทอดแคดเมียมจากน้ำสู่แพลงก์ตอนพืชพบว่าหลังจากใส่ *Chlorella* ในสารละลายแคดเมียม ปริมาณแคดเมียมลดลงอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรก (ภาพที่ 6) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุมการทดลองแคดเมียมเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นมีค่าแคดเมียมลดลง 92.62% และมีปริมาณแคดเมียมสะสมใน *Chlorella* อยู่ 349.15 ± 2.97 ไมโครกรัมต่อกรัม แพลงก์ตอนพืช (น้ำหนักแห้ง) ส่วนชุมการทดลองเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นลดลง 99.33 % และมีแคดเมียมสะสมอยู่ในแพลงก์ตอนพืช 2530.79 ± 179.39 ไมโครกรัมต่อกรัม

ซึ่งพบว่าแพลงก์ตอนพืชสามารถดูดซับแคดเมียมจากน้ำไว้ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับตะกอนดิน และเมื่อเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมต่อกรัมน้ำหนักแห้งแล้ว ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในแพลงก์ตอนพืชมีมากกว่าในตะกอนดิน เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชนั้นผสมอยู่ทั่วไปในมวลน้ำ เซลล์แพลงก์ตอนพืชสามารถสัมผัสสารละลายแคดเมียมได้ทุกทิศทาง แต่ตะกอนดินนั้นอยู่ที่พื้นท้องน้ำ จึงสัมผัสสารละลายแคดเมียมได้เฉพาะผิวหน้าดินเท่านั้น

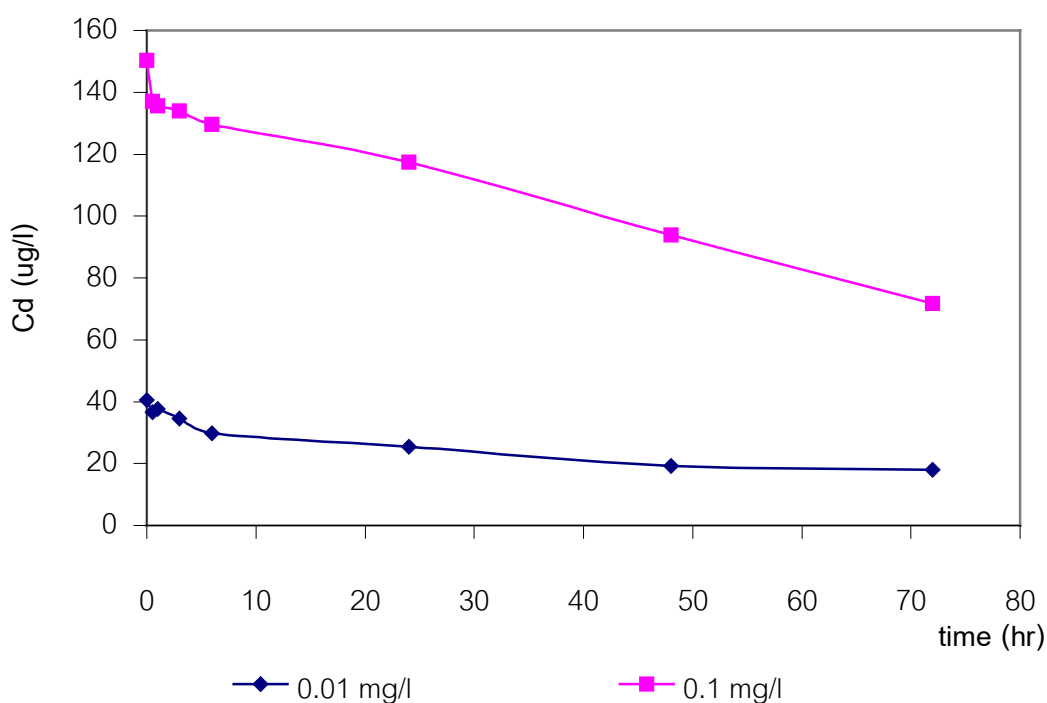


ภาพที่ 6 ปริมาณแคดเมียมในน้ำที่สัมผัส *Chlorella* ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

2.3 การสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนสัตว์

การศึกษาการถ่ายทอดแคดเมียมจากน้ำสู่ไรแดงซึ่งมีค่า LC_{50} คือ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นค่าที่ไม่เป็นอันตรายจึงมีค่าประมาณ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าหลังจากใส่ไรแดงในสารละลายแคดเมียมนั้นปริมาณแคดเมียมในน้ำมีค่าลดลงเล็กน้อยตลอดการทดลอง (ภาพที่ 7) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองชุดทดลองที่แคดเมียมเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าแคดเมียมลดลง 55.67 % และมีแคดเมียมสะสมในไรแดง 55.35 ± 1.18 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนชุดที่เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าลดลง 52.32 % และมีแคดเมียมสะสมในไรแดง 598.53 ± 32.88 ไมโครกรัมต่อกรัม

ในชุดทดลองนี้ไรแดงสัมผัสกับสารละลายแคดเมียมโดยตรง ดังนั้นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในไรแดงมาจากการที่บริเวณเปลือกคลุมลำตัวของไรแดง (carapace) ซึ่งเป็นสารประเภทไคติน (chitin) มีคุณสมบัติสามารถดูดซับแคดเมียมจากน้ำไว้ได้ดี สอดคล้องกับการศึกษาของ Robinson (2003) ที่ทดลองนำไรน้ำชนิด *Daphnia magna* และ *Ceriodaphnia dubia* มาดูดซับแคดเมียมจากสารละลาย พบว่าเปลือกคลุมตัวของไรน้ำสามารถดูดซับแคดเมียมไว้ได้ในปริมาณมาก ซึ่งแคดเมียมที่สะสมที่เปลือกคลุมตัวนี้ยังสามารถถ่ายทอดไปยังผู้บริโภ�ขั้นถัดไปได้

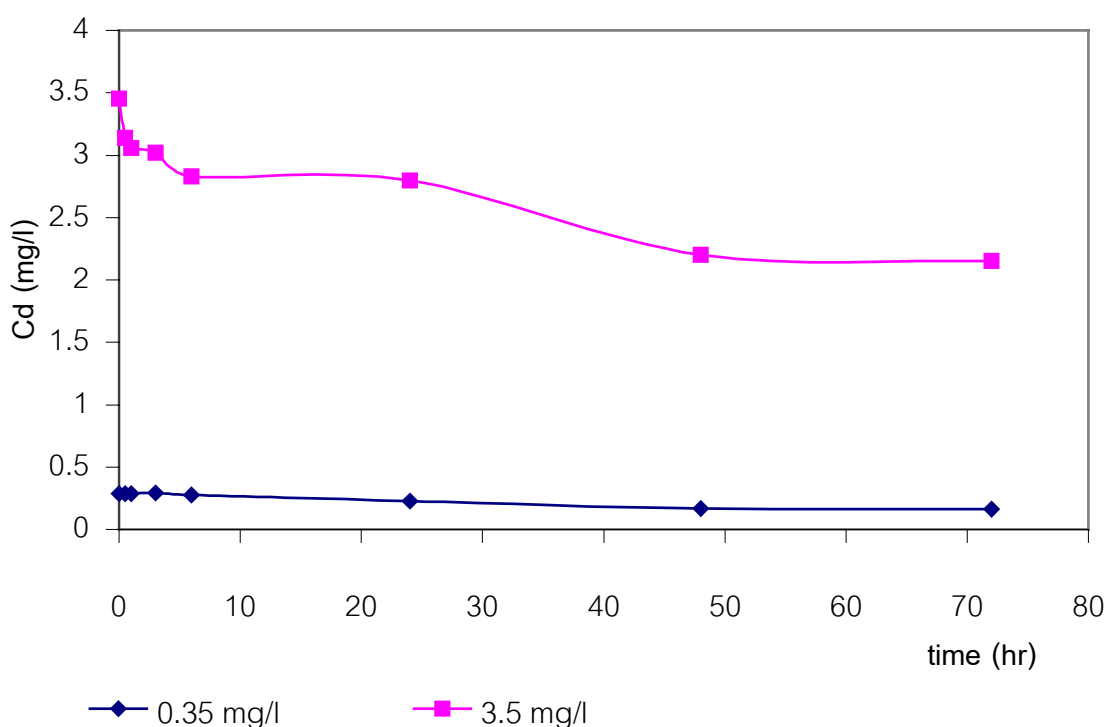


ภาพที่ 7 ปริมาณแคดเมียมในน้ำที่สัมผัสไรแดง

2.4 การสะสมของแคดเมียมในปลา

การศึกษาการถ่ายเทแคดเมียมจากน้ำสู่ปลา โดยปลาที่ทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.55 ± 0.6 กรัม พบว่าเมื่อใส่ปลาลงในสารละลายแคดเมียมนั้น ปริมาณแคดเมียมในน้ำมีปริมาณลดลงเล็กน้อย (ภาพที่ 8) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองชุดทดลองแคดเมียมเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมลดลง 42.20 % และมีปริมาณแคดเมียมสะสมในเนื้อปลา 3.53 ± 0.21 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักเปียก (ปลาที่ตาย) และ 1.43 ± 0.12 ไมโครกรัมต่อกรัม (ปลาที่ไม่ตาย) ส่วนชุดทดลองที่แคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแคดเมียมลดลง 37.69 % และมีแคดเมียมสะสมในเนื้อปลา 28.68 ± 8.44 ไมโครกรัมต่อกรัม (ปลาตาย) และ 7.30 ± 2.25 ไมโครกรัมต่อกรัม (ปลาไม่ตาย) ซึ่งพบว่าในปลาตายมีปริมาณแคดเมียมสะสมในเนื้อปลามากกว่าปลาที่ไม่ตาย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (เทียบที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมเดียวกัน)

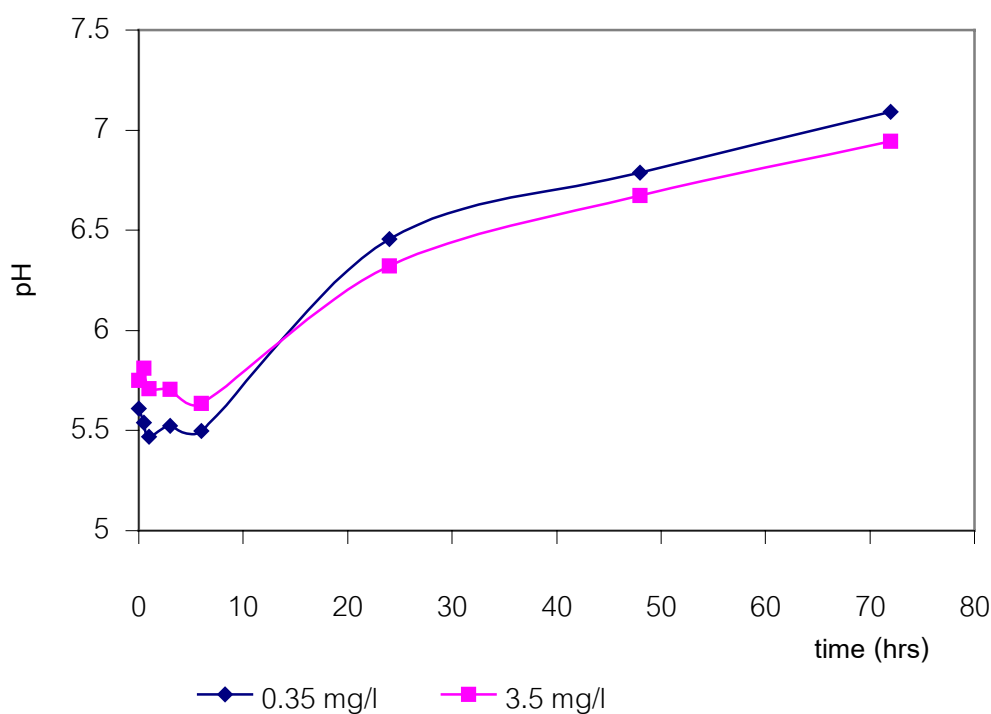
ซึ่งในกรณีชุดทดลองนี้แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายของปลาคูได้โดยการแพร่เข้าทางผิวหนัง เนื่องจากปลาคูเป็นปลาที่ไม่มีเกล็ดแคดเมียมจึงแพร่เข้าสู่ร่างกายได้ง่ายขึ้น อีกทางหนึ่งคือเข้าไปกับน้ำที่ปลาคูกรองหรือกินเข้าไป



ภาพที่ 8 ปริมาณแคดเมียมในน้ำที่สัมผัสปลา

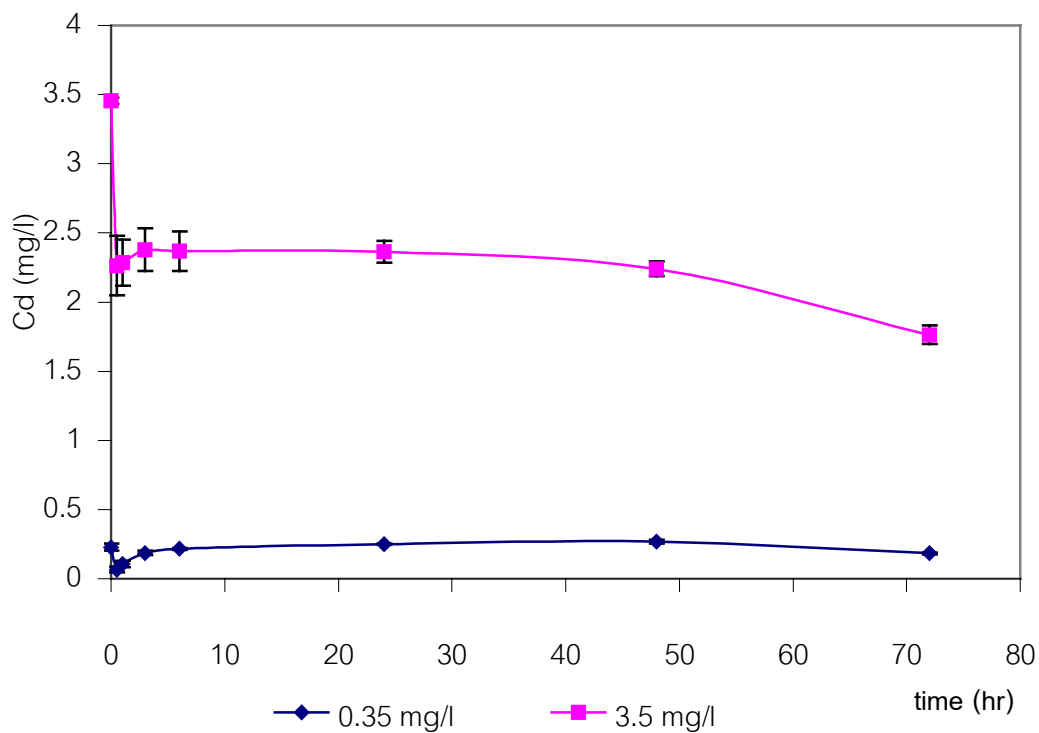
2.5 การสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา

ตลอดการทดลองค่าพีเอชของชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 5.47-7.09 โดยค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดลองเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 9) โดยปริมาณแคดเมียมในสารละลายมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก จากนั้นมีการลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วง 30 นาทีแรกแคดเมียมถูก *Chlorella* ดูดซับไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในช่วง 30 นาทีแรกแคดเมียมจึงลดลงอย่างมาก จากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจาก *Chlorella* ดูดซับแคดเมียมไว้จนอิ่มตัวแล้ว การดูดซับแคดเมียมออกจากสารละลายจึงเกิดได้ช้า ๆ โดยพบว่าที่สิ้นสุดการทดลอง (ภาพที่ 10) ในชุดทดลองที่มีแคดเมียมเริ่มต้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร แคดเมียมลดลงไปจากน้ำ 19.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชุดทดลองที่มีแคดเมียมเริ่มต้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แคดเมียมลดลง 48.94 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 9 ค่าพีเอชของชุดทดลองที่ประกอบด้วยแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา

เมื่อนำ *Chlorella* มาสกัดหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่พบว่า *Chlorella* สามารถดูดซับแคดเมียมไว้ได้ 162.66 ± 19.19 และ 510.14 ± 12.70 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนการสะสมในไรแดงพบว่ามีแคดเมียมสะสมอยู่ 34.07 ± 8.11 และ 210.48 ± 17.36 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ



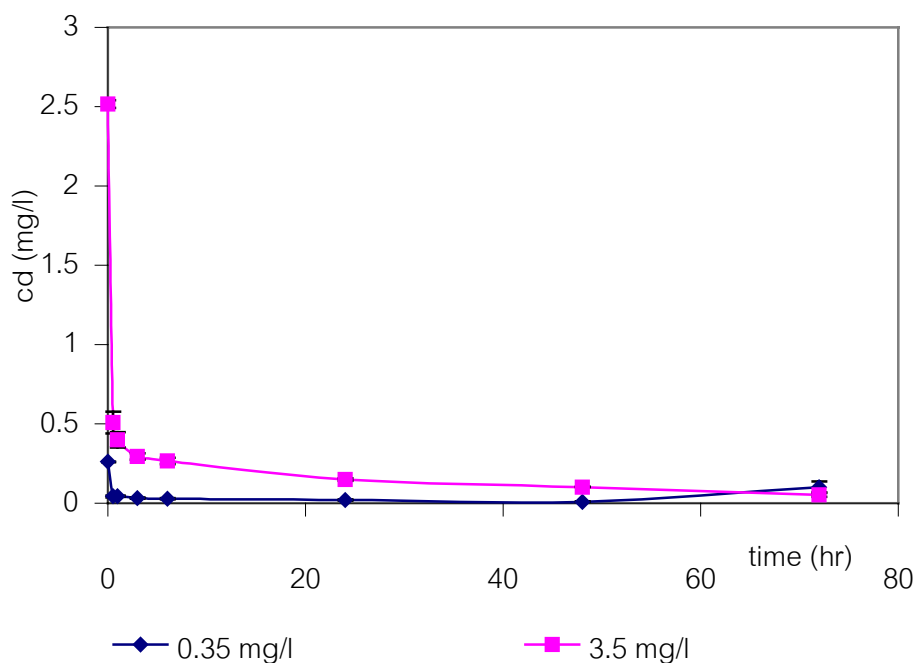
ภาพที่ 10 ปริมาณแคดเมียมในน้ำที่สัมผัสแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลาพร้อมกัน

ปลาที่ใช้ทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.31 ± 0.17 กรัม ปลาตกมีการตายระหว่างการทดลอง ในวันที่ 2 ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการตายของปลาคู 1 ตัว และเมื่อนำเนื้อมาสกัดพบว่ามีปริมาณแคดเมียมในเนื้อปลาสด 0.62 ± 0.02 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ส่วนปลาที่ไม่ตายมีปริมาณแคดเมียม 0.15 ± 0.01 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนชุดที่แคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปลาตายมีแคดเมียม 45.63 ± 5.79 ไมโครกรัมต่อกรัม ปลาที่ไม่ตายมีปริมาณ 8.35 ± 1.02 ไมโครกรัมต่อกรัม

2.6 การสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดิน

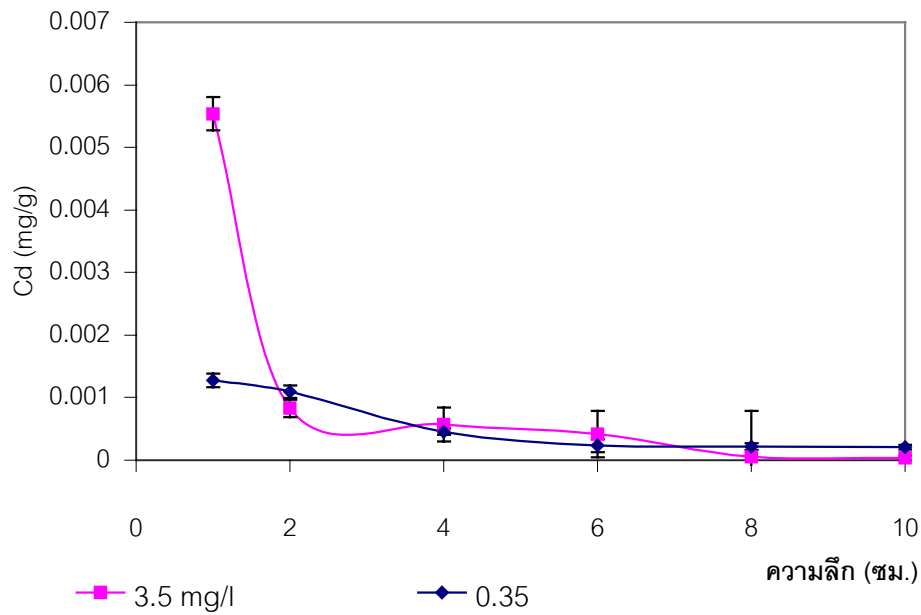
การศึกษาการสะสมของแคดเมียมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในระบบที่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดและดินอยู่รวมกัน ปลาที่ใช้ทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 7.48 ± 1.10 กรัม พบว่าปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก (ภาพที่ 11) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในชุดทดลองแคดเมียม 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมลดลง 61.05 % (เหลืออยู่ 0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมีการสะสมของแคดเมียมใน *Chlorella* 81.60 ± 14.78 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในไรแดง 44.02 ± 2.63 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในปลา 1.54 ± 0.15 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ส่วนในชุดการทดลองที่แคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

แคดเมียมลดลงจากน้ำ 97.89 % (เหลืออยู่ 0.052 มิลลิกรัมต่อลิตร) และสะสมใน *Chlorella* 586.18 ± 23.37 ไมโครกรัมต่อกรัม ในไรแดง 141.52 ± 26.74 ไมโครกรัมต่อกรัม ในปลา 1.98 ± 0.05 ไมโครกรัมต่อกรัม และพบว่าทั้งสองชุดการทดลองมีการสะสมของแคดเมียมที่ระดับผิวดินสูงและเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินมีลดลง โดยชุดทดลองสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความลึกของดิน 1 เซนติเมตร มีปริมาณแคดเมียมสะสมอยู่ 1.27 ± 0.10 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ที่ระดับ 8-10 เซนติเมตร มีแคดเมียม 0.20 ± 0.03 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนชุดทดลองแคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับดิน 1 เซนติเมตร มีปริมาณแคดเมียม 5.53 ± 0.26 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่ระดับความลึก 8-10 ซม. มีปริมาณแคดเมียม 0.03 ± 0.001 ไมโครกรัมต่อกรัม (ภาพที่ 12, ตารางผนวกที่ 2)



ภาพที่ 11 ปริมาณแคดเมียมในน้ำที่สัมผัส แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดิน พร้อมกัน

โดยพบว่าในชุดการทดลองนี้ทั้งสองระดับความเข้มข้นของแคดเมียมไม่มีการตายของปลาเลยจากการศึกษาในข้อ 2.5 ซึ่งมีอัตราส่วนของสิ่งมีชีวิตและโลหะหนักเท่ากัน แต่มีการตายของปลาเกิดขึ้น แสดงว่าดินที่ใส่เพิ่มเข้ามาในระบบการทดลองนี้มีส่วนช่วยในการดูดซับปริมาณแคดเมียมออกไปจากสารละลายได้ดีจึงทำให้เป็นอันตรายต่อปลาลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีดินแล้วมีปริมาณต่ำกว่ามาก ซึ่ง Dekker (2002) ได้รายงานว่ไรน้ำชนิด *Chydorus piger* ที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมที่มีดินในระบบ จะมีอายุสั้นลงเพราะได้รับพิษของแคดเมียมมากขึ้นจากการกรองกินตะกอนดิน



ภาพที่ 12 ปริมาณแคดเมียมในดินที่ระดับความลึกแตกต่างกัน
ชุดทดลองผสมแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดิน

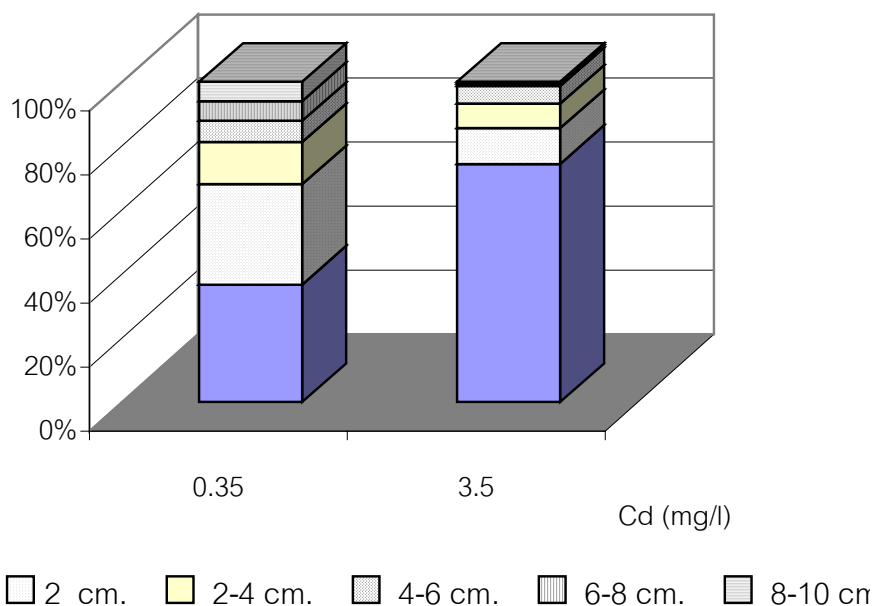
ตารางที่ 4 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในน้ำ จากแหล่งน้ำต่าง ๆ

แหล่งน้ำ	Cd (ug/l)	เอกสารอ้างอิง
Boobeek, Belgium	0.6-4.3	Bervoets et al. 2001
Looiendse Nete, Belgium	0.3-0.8	Bervoets et al. 2001
Achterste Nete, Belgium	0.7-1.6	Bervoets et al. 2001
Balense gracht, Belgium	0.1-0.7	Bervoets et al. 2001
Noorbeek, Belgium	0.1-1.6	Bervoets et al. 2001
Lake water, Egypt	0-202	Mansour and Sidky, 2002
Fish farm water, Egypt	0-16	Mansour and Sidky, 2002
Irrigation water, Egypt	52-68	Mansour and Sidky, 2002
Lake Tanganyika, Tanzania		
-inshore	<10	Chale, 2002
-offshore	<10	Chale, 2002

ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในน้ำในชุดการทดลองที่มีค่าแคดเมียมเริ่มต้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียม 0.009 และ 0.052 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดทดลองที่ใส่สิ่งมีชีวิตทุกชนิด แต่ไม่ใส่ดิน คือมีปริมาณแคดเมียมเหลืออยู่ในน้ำ 0.184 และ 1.763 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตามลำดับ ซึ่งในระบบที่มีดินอยู่ดินจะเป็นตัวช่วยในการดูดซับโลหะหนักได้ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ (ตารางที่ 4) พบว่ามีปริมาณสูงกว่าค่อนข้างมาก แต่มีค่าใกล้เคียงกับที่พบในทะเลสาปและน้ำในแหล่งชลประทานของ Egypt

จากการจำลองระบบนิเวศทางน้ำในการทดลองนี้ ซึ่งมีการผสมรวม น้ำ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดินไว้ด้วยกัน พบว่าเมื่อใส่สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป เมื่อระยะผ่านไป 72 ชั่วโมง ปริมาณแคดเมียมในน้ำเหลืออยู่ 0.009 และ 0.052 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าในน้ำควรมีแคดเมียมไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร (Sindermann, 1996) ซึ่งในชุดทดลองที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นมีปริมาณเหลือใกล้เคียงกับเกณฑ์ที่กำหนดคือมีแคดเมียมเหลืออยู่ 0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเนื้อปลาจากชุดทดลองนี้ มีปริมาณถึง 1.54 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) หรือ 10.28 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดให้มีในเนื้อปลาคือต้องไม่เกิน 0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) (FAO, 1983) ซึ่งแสดงว่าแม้พบว่าปริมาณแคดเมียมในน้ำมีน้อยใกล้เคียงค่ามาตรฐานปลอดภัยแต่แท้จริงแล้วปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในสัตว์น้ำที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้นมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานปลอดภัยมาก



ภาพที่ 13 ร้อยละของแคดเมียมที่แพร่กระจายในระดับความลึกต่าง ๆ

ชุดทดลองใส่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดรวมกัน

สัดส่วนการสะสมของแคดเมียมในชุดทดลองที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น ที่ผิวดิน (0-1 เซนติเมตร) มีแคดเมียมสะสมอยู่ 36.6 เปอร์เซ็นต์ ใกล้เคียงกับที่

ระดับ 1-2 เซนติเมตรคือ 31 เปอร์เซ็นต์ และที่ระดับความลึกที่ 8-10 เซนติเมตร มีแคะเมียมสะสมอยู่ 5.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชุดทดลองที่มีความเข้มข้นของแคะเมียมในสารละลายตั้งต้นเท่ากับ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ผิวดินมีการสะสมแคะเมียมมากถึง 47.4 เปอร์เซ็นต์ และลดลงเรื่อย ๆ ตามระดับความลึก และที่ระดับความลึก 8-10 เซนติเมตร พบแคะเมียมเพียง 0.51 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 13)

การสะสมของแคะเมียมในดินในชุดการทดลองนี้ให้ผลเช่นเดียวกับชุดทดลองที่ดินสัมผัสสารละลายแคะเมียมโดยตรงไม่มีสิ่งมีชีวิตอื่นปน คือมีส่วนการสะสมที่ระดับผิวดิน 0-1 เซนติเมตรมากที่สุด และส่วนการสะสมลดลงเรื่อย ๆ ตามระดับความลึกของดินที่เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายแคะเมียมที่สูงกว่าจะมีส่วนการสะสมที่ผิวดินมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูง ๆ นั้น มีไอออนของแคะเมียมอยู่ในสารละลายมากกว่า และมีความหนาแน่นมาก ทำให้มีแรงผลักเข้าสัมผัสกับดินได้มาก ดินจึงดูดซับไว้ได้เต็มที่ ส่วนที่ความเข้มข้นต่ำ ปริมาณไอออนของแคะเมียมมีอยู่น้อยในน้ำ จึงถูกโมเลกุลน้ำล้อมรอบไว้หนา เมื่อน้ำซึมลงสู่ดินที่ระดับความลึกมากขึ้น โอกาสที่ดินจะสัมผัสกับแคะเมียมได้โดยตรงจึงน้อยกว่า แคะเมียมจึงแพร่ลงในระดับที่ลึกได้มากขึ้น ส่วนการสะสมที่ระดับ 0-2 เซนติเมตร จึงไม่ค่อยต่างกันมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคะเมียมที่พบจากทั้งสองชุดการทดลอง พบว่าในชุดทดลองที่ดินสัมผัสสารละลายแคะเมียมเพียงอย่างเดียว (ไม่มีสิ่งมีชีวิตอื่น) ปริมาณแคะเมียมที่สะสมในดินมีมากกว่าชุดทดลองที่ผสมสิ่งมีชีวิตอื่นในสารละลายแคะเมียมด้วยประมาณ 3-4 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากในชุดทดลองที่มีสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นผสมอยู่นั้น สิ่งมีชีวิตอื่นสามารถช่วยดูดซับแคะเมียมออกไปจากสารละลายได้มาก โดยเฉพาะแบคทีเรียที่กินพืช ทำให้ปริมาณแคะเมียมเหลืออยู่ในสารละลายน้อย จึงสะสมในดินน้อย

การที่ดินตะกอนมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีโดยเฉพาะที่ผิวดิน มีปริมาณโลหะหนักสะสมอยู่เป็นปริมาณมาก ย่อมส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ตามผิวน้ำดิน โดยเฉพาะหอย ซึ่งล้วนกรองกินตะกอนในน้ำเป็นอาหาร โดยปริมาณโลหะหนักจากดินตะกอนสามารถถ่ายทอดไปยังสัตว์น้ำเหล่านั้นได้ (Chale, 2002; Cheggour, 2001; Das and Jana, 2003; Roper, et al., 1991)

ปริมาณแคะเมียมที่สะสมในผิวดิน 0-1 เซนติเมตร จากการทดลองระบบนิเวศทางน้ำจำลองนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคะเมียมในดินจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (ตารางที่ 5) พบว่าส่วนใหญ่แล้วปริมาณแคะเมียมในการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่าแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ อ่างเก็บน้ำ และทะเลสาบ ทั้งจาก Hong Kong, Vietnam และ Philippine เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการทดลองใช้ระยะเวลาเพียง 3 วัน ปริมาณแคะเมียมในน้ำก็ถูกดูดซับไปเกือบหมด และปริมาณแคะเมียมมีจำกัดในน้ำเนื่องจากไม่มีการเติมสารละลายแคะเมียมเพิ่มเข้าในระบบ ปริมาณจึงน้อยกว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งได้รับโลหะหนักต่อเนื่องเป็นเวลานาน

ตารางที่ 5 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินจากแหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ

แหล่งน้ำ	Cd (ug/g dry wt.)	เอกสารอ้างอิง
River		
Ganga, India	2.55	Jain, 2004
Toyohira, Japan	0.2	Jain, 2004
Illinois, USA	2	Jain, 2004
Yamuna, India	9.5	Jain, 2004
Shing Mun River, Hong Kong	2400-4000	Zhou, 1998
Lam Tsuen and Tai Po River, Hong Kong	1700-3900	Zhou, 1998
Duyen Hai and Ho Chi Min, Vietnam	60-100	Kurokawa and Tatsukawa, 1990
Pasig River, Philipines	2030-15200	Prudent et al, 1994
Marikina river, Philipines	1470-2590	Prudent et al, 1994
Rhine, 1945	4000	Beurkens et al., 1994
Rhine, 1965	20000	Beurkens et al., 1994
Rhine, 1985	11000	Beurkens et al., 1994
Tisza, Hungary	2500	Fleit and Lakatos, 2003
Boobeek, Belgium	0.72	Bervoets et al. 2001
Looiendse Nete, Belgium	0.34	Bervoets et al. 2001
Achterste Nete, Belgium	0.15	Bervoets et al. 2001
Balense gracht, Belgium	0.07	Bervoets et al. 2001
Noorbeek, Belgium	0.2	Bervoets et al. 2001
Lake		
Lake Zurich, Switzerland	19100	Gunten et al., 1997
Lake Ketelmeer, Netherlands	16000	Hulscher et al., 1992
Lake Tanganyika, Tanzania		
-inshore	200	Chale, 2002
-offshore	<10	Chale, 2002
Reservoir		
Patroon Reservoir, USA	25000	Arnason, et al, 2003
Melter Reservoir, Germany	91000	Muller et al., 2000

ตารางที่ 5 (ต่อ)

แหล่งน้ำ	Cd (ug/g dry wt.)	เอกสารอ้างอิง
Lagoon		
Sidi Moussa, Morocco	3-4.7	Cheggour et al., 2001
Bay		
Moulay Bou Selham, Morocco	0.6-1.5	Cheggour et al., 2001
Terrestrial soil	59-168 mmol/l	Taylor and Percival, 2001

ขั้นที่ 3 ศึกษาการถ่ายทอดปริมาณแคดเมียมในห่วงโซ่อาหาร

3.1 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมใน *Chlorella*

เมื่อนำ *Chlorella* ไปดูดซับแคดเมียมเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วแยก *Chlorella* ออกจากสารละลาย แคดเมียม พบว่าในชุดที่แคดเมียมเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคดเมียมในสารละลายลดลง 55.82 เปอร์เซ็นต์ และมีแคดเมียมสะสมใน *Chlorella* 194 ± 1.8 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนชุดทดลองที่แคดเมียมเข้มข้นเริ่มต้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคดเมียมในสารละลายลดลง 62.86 เปอร์เซ็นต์ มีแคดเมียมสะสมใน *Chlorella* 1140.60 ± 20.06 ไมโครกรัมต่อกรัม แคดเมียมที่สะสมใน *Chlorella* นั้นอยู่ทั้งที่ผิวเซลล์และภายในเซลล์ โดยมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จะพบที่ภายในเซลล์ (Matsunaga, 1999) ดังนั้นเมื่อ *Chlorella* ถูกกินเป็นอาหาร จึงสามารถถ่ายทอดต่อไปยังผู้บริโภคได้

3.2 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในไรแดง

จากการนำ *Chlorella* ที่มีการดูดซับแคดเมียมแล้วมาเป็นอาหารของไรแดงโดยใช้เลี้ยงไรแดง เป็นระยะเวลา 2 วัน พบว่าไรแดงบางส่วนที่เลี้ยงด้วย *Chlorella* ที่ดูดซับแคดเมียม 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มตายในวันแรก ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และมีการตายเพิ่มขึ้นในวันที่สอง ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงมีการเก็บไรแดงที่ตายในแต่ละวันออกเพื่อป้องกันน้ำเน่า เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเลี้ยงที่ 48 ชั่วโมงและนำไรแดงบางส่วนมาสกัด พบว่าในชุดไรแดงที่กิน *Chlorella* ที่ดูดซับแคดเมียม 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมสะสมในตัว 16.48 ± 2.23 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนไรแดงที่กิน *Chlorella* ที่ดูดซับแคดเมียม 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมสะสมในตัว 56.60 ± 3.23 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนในชุดควบคุมคือไรแดงกิน *Chlorella* ที่ไม่ได้รับแคดเมียมมีปริมาณแคดเมียมอยู่ในไรแดง 0.01 ± 0.004 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งแคดเมียมที่พบในไรแดงที่เลี้ยงด้วยอาหารปกตินี้อาจมาจากการปนเปื้อนของระบบได้ ปริมาณแคดเมียมที่มี

ในไรแดงจากทั้ง 3 ชุดการทดลองพบว่าปริมาณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในไรแดงมาจากอาหารที่กินเข้าไปคือ *Chlorella* ที่มีแคดเมียมสะสมอยู่ ได้มีรายงานว่าไรน้ำที่ได้รับแคดเมียมมาจากอาหารที่กินเข้าไป จะมีแคดเมียมสะสมอยู่ในส่วนเนื้อเยื่อและทางเดินอาหารเป็นหลัก (Robinson, 2003) โดยปกติแล้วแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มไรน้ำ เมื่อได้รับพิษของแคดเมียมจะส่งผลกระทบต่อวงจรชีวิต เช่นมีการตอบสนองต่อแสงช้าลง (Michaels et al., 2000) อัตราการกินอาหารและการสืบพันธุ์ลดลง (Baillieul and Blust, 1999; Barata and Baird, 2000; Orchard et al., 2002) อัตราการเจริญเติบโตลดลง อัตราการว่ายน้ำช้าลง (Baillieul and Blust, 1999) ความคงไขลดลง (Santojanni, 1998) เพิ่มระยะเวลาในการฟักตัวของตัวอ่อนภายในตัวแม่ (Guilhermino et al., 1996) ซึ่งการทดลองนี้ในทุกชุดการทดลองที่ไรแดงสัมผัสกับแคดเมียมไม่ว่าจะเป็นทางสารละลายหรือทางการกินอาหารนั้นไม่พบความผิดปกติของการสืบพันธุ์หรือการกินอาหารอย่างเด่นชัด เนื่องจากทดลองเพียงระยะสั้น แต่พบว่ามีผลต่อการเคลื่อนที่ ไรแดงชุดที่สัมผัสสารละลายแคดเมียมเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าการเคลื่อนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

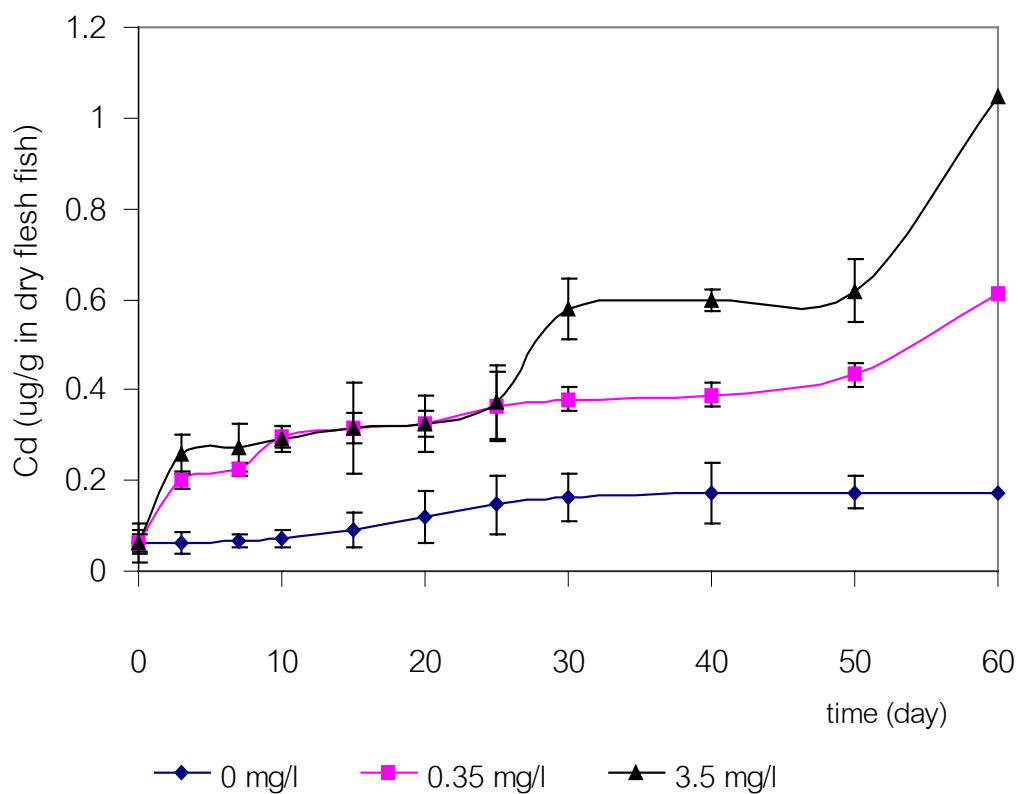
3.3 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในปลา

การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมจากไรแดงสู่ปลาโดยผ่านทางอาหาร ด้วยวิธีนำไรแดงที่มีแคดเมียมสะสมอยู่มาเป็นอาหารปลา โดยปลาที่ใช้ทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 9.04 ± 0.5 กรัม โดยเลี้ยงปลาเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเนื้อปลามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการได้รับอาหารนานขึ้น และปลาที่ได้รับไรแดงที่มีแคดเมียมในปริมาณสูงกว่าจะทำให้ส่วนเนื้อปลามีปริมาณแคดเมียมสูง โดยปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเนื้อปลานั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกที่ได้รับอาหาร (ภาพที่ 14) จากนั้นในชุดการทดลองที่ใช้ไรแดงได้รับ *Chlorella* 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นอาหาร ปริมาณแคดเมียมในเนื้อปลาจะเริ่มสูงอีกครั้งในวันที่ 10 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงวันที่ 50 ของการทดลอง โดยเพิ่มสูงสุดในวันที่ 60 และพบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเนื้อปลาคือ 0.117 ± 0.005 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) (0.6097 ± 0.024 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) ส่วนปลาที่กินไรแดงที่ได้รับ *Chlorella* ที่ดูดซับแคดเมียม 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นอาหารนั้น หลังจาก 3 วันแรก ปริมาณแคดเมียมในเนื้อจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นสูงมากในวันที่ 30 จากนั้นจะคงที่จนถึงวันที่ 50 และเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 60 โดยมีปริมาณสะสมในเนื้อปลาเท่ากับ 0.201 ± 0.013 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) (1.05 ± 0.06 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)

การสะสมแคดเมียมในเนื้อปลาคูนี้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกินอาหารที่ปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hansen et al. (2002) ซึ่งทดลองเลี้ยงปลา bull trout ในสารละลาย

แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ และจากการทดลองนี้พบว่าในช่วง 25 วันแรก ปริมาณแคดเมียมในกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นจึงเพิ่มอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเนื่องมาจากในช่วงแรกอวัยวะภายในของปลาโดยเฉพาะตับ และ ไต ยังสามารถรับแคดเมียมเพิ่มได้อีก ดังนั้นแคดเมียมส่วนใหญ่จึงสะสมอยู่ในนั้น จนเมื่อตับและไตไม่สามารถรับแคดเมียมเพิ่มได้อีก หรือไม่สามารถกำจัดแคดเมียมได้ทัน ปริมาณแคดเมียมจึงแพร่กระจายมายังส่วนเนื้ออย่างรวดเร็วและเพิ่มปริมาณมากขึ้น (Cinier et al., 1999)

ปริมาณแคดเมียมที่พบในเนื้อปลาจากการทดลองที่กินไรแดงปนเปื้อนแคดเมียมในระดับ 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร นี้มีปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่พบในสัตว์น้ำธรรมชาติในหลาย ๆ ชนิด (ตารางที่ 6) แต่ยังมีค่าต่ำกว่าสัตว์น้ำบางชนิดเช่นสัตว์น้ำพวก krill หอย หมึก และเต่า ส่วนปลาคูที่กินไรแดงปนเปื้อนแคดเมียมในระดับ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมในเนื้อสูงกว่าในปลาธรรมชาติเกือบทุกชนิด แต่มีค่าต่ำกว่าปลา *Colisa fasciatus* ที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตรง โดยพบว่าเพียง 25 วัน มีปริมาณแคดเมียมในกล้ามเนื้อมากถึง 7.7 ไมโครกรัมต่อกรัม และเมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่พบในแพลงก์ตอนสัตว์ หอย หมึก หรือเต่า ซึ่งอยู่ในระดับห่วงโซ่อาหารที่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกันนั้น พบว่าในการทดลองนี้ยังมีปริมาณแคดเมียมในเนื้อปลาคูต่ำกว่ามาก



ภาพที่ 14 ปริมาณแคดเมียมในเนื้อปลาที่กินไรแดงปนเปื้อนด้วยแคดเมียม (โดยการเลี้ยงไรแดงด้วยคลอเรลลาที่สัมผัสแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ)

ตารางที่ 6 ปริมาณแคดเมียมที่พบในกล้ามเนื้อปลา และสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ ในแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ

ชนิดปลา	Cd (ug/g dry wt.)	เอกสารอ้างอิง
<i>Sardinella aurita</i> , France	0.02	Romeo et al., 1999
<i>Trachurus trachurus</i> , France	0.04	Romeo et al., 1999
<i>Scomber japonicus</i> , France	0.03	Romeo et al., 1999
<i>Serranus scriba</i> , France	0.02-0.05	Romeo et al., 1999
<i>Epinephelus costae</i> , France	0.02-0.03	Romeo et al., 1999
<i>Cephalopholis nigri</i> , France	0.06	Romeo et al., 1999
<i>Pseudupeneus prayensis</i> , France	0.02	Romeo et al., 1999
<i>Sebastes jordani</i> , California	0.52-1	Sydeman and Jarman, 1998
<i>Engraulis mordax</i> , California	0.73-0.99	Sydeman and Jarman, 1998
<i>Salmo trutta</i> , Spain	0.00057-0.00284	Bordajandi, 2003
<i>Anguilla anguilla</i> , Spain	0.00296-0.00792	Bordajandi, 2003
<i>Barbus barbus</i> , Spain	0.00011-0.00439	Bordajandi, 2003
<i>Lates marie</i> , Tanzania	0.25	Chale, 2002
<i>Lates stappersii</i> , Tanzania	0.28	Chale, 2002
<i>Limnothrissa miodon</i> , Tanzania	0.38	Chale, 2002
<i>Stolothrissa tanganyicae</i> , Tanzania	0.39	Chale, 2002
<i>Chrysostys</i> spp. , Tanzania	0.28	Chale, 2002
<i>Raiamas moorei</i> , Tanzania	0.20	Chale, 2002
<i>Oreochromis</i> spp. , Tanzania	0.20	Chale, 2002
<i>Alestes</i> sp. , Tanzania	0.20	Chale, 2002
<i>Lethrinus lentjan</i> , United Arab Emirates		
-Female	0.12 (wet wt.)	Al-Yousuf et al., 2000
-Male	0.09 (wet wt.)	Al-Yousuf et al., 2000
-Not determined sex	0.11 (wet wt.)	Al-Yousuf et al., 2000
<i>Tilapia</i> , Inland water, Hong Kong		
-Fo Tan	0.54	Zhou et al. 1998
-Tai Wai	0.50	Zhou et al. 1998
-Mai Po	0.34	Zhou et al. 1998

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ชนิดปลา	Cd (ug/g dry wt.)	เอกสารอ้างอิง
<i>Tilapia</i> sp., Egypt		
-1997/1998 ทะเลสาป/ฟาร์มเลี้ยง	0.42/0.25 (wet wt.)	Mansour and Sidky, 2002
-1998/1999 ทะเลสาป/ฟาร์มเลี้ยง	0.239/0.019 (wet wt.)	Mansour and Sidky, 2002
<i>Mugil</i> sp., Egypt		
-1997/1998 ทะเลสาป/ฟาร์มเลี้ยง	0.79/0.62 (wet wt.)	Mansour and Sidky, 2002
-1998/1999 ทะเลสาป/ฟาร์มเลี้ยง	0.659/0.019 (wet wt.)	Mansour and Sidky, 2002
<i>Solea aegyptiaca</i> , Egypt		
-1998/1999 ทะเลสาป	0.001 (wet wt.)	Mansour and Sidky, 2002
<i>Aldrichetta forsteri</i> + <i>Sillago schomburgkii</i>	(wet wt.)	
Wills Creek: summer/winter/spring, Australia	<0.05/<0.05/<0.05	Edwards et al., 2001
Barker Inlet: summer/winter/spring	0.055/0.028/0.052	Edwards et al., 2001
Port Pirie: summer/winter/spring	0.079/0.075/0.109	Edwards et al., 2001
เลี้ยงปลาในสารละลายเคเคเทียม		
Salvelinus confluentus-bull trout		Hansen et al., 2002
Cd 0 µg/l เลี้ยง 20/40/55 วัน	0.122/0.075/0.080	
Cd 0.052 µg/l เลี้ยง 20/40/55 วัน	0.162/0.154/0.170	
Cd 0.089 µg/l เลี้ยง 20/40/55 วัน	0.193/0.200/0.204	
Cd 0.197 µg/l เลี้ยง 20/40/55 วัน	0.237/0.307/0.379	
Cd 0.383 µg/l เลี้ยง 20/40/55 วัน	0.357/0.490/0.572	
Cd 0.786 µg/l เลี้ยง 20/40/55 วัน	0.456/0.766/0.913	
<i>Colisa fasciatus</i>		Tayal et al., 2000
Cd 1000 µg/l เลี้ยง 8/16/24 ชั่วโมง	0/0.6/2.6	
เลี้ยง 5/10/15/25 วัน	2.8/3.6/6.8/7.7	
Krill, California	2.2-2.7	Sydeman and Jarman, 1998
หอย		
<i>Lamellidens marginalis</i> ,		
-natural water	10-19	Das and Jana, 2003
-cadmium contaminated water	574	Das and Jana, 2003
zebra mussel	0.79	Roper et al., 1991

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ชนิดสัตว์น้ำ	Cd (ug/g dry wt.)	เอกสารอ้างอิง
หอย		
<i>Cerastoderma edule</i>		
-Moulay Bou Selham lagoon, Morocco	1.57	Cheggour et al., 2001
-Sidi Moussa lagoon, Morocco	2.37	Cheggour et al., 2001
<i>Mutela spekei</i> , Tanzania	0.43	Chale, 2002
หมีก <i>Sepioteuthis lessoniana</i>	3.10 (wet wt.)	Koyama et al., 2000
เต่า loggerhead turtles-kidney, France	13.3 (wet wt.)	Caurant et al., 1999
Leather back-kidney, France	30.3 (wet wt.)	Caurant et al., 1999

เมื่อปลาได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย แคดเมียมจะแพร่กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ โดยในช่วงแรกจะมีปริมาณแคดเมียมสะสมในอวัยวะภายในบริเวณไตและตับมากที่สุด เมื่อสะสมจนเกิดขีดความสามารถในการลดพิษ (โดยการสร้าง metallothioneins) แล้ว แคดเมียมจะแพร่กระจายไปยังส่วนอื่นของร่างกาย ดังนั้นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในอวัยวะภายในของปลาจึงสูงกว่าที่กล้ามเนื้อมาก จากการทดลองเลี้ยงปลา *Cyprinus carpio* ในสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 53 และ 443 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 127 วัน พบว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในไตสูงกว่าในกล้ามเนื้อ 50 และ 100 เท่าตามลำดับ (Cinier et al., 1999) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าแคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณโซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม ในกล้ามเนื้อปลาลดลง รวมทั้งไปลดกิจกรรมในการสร้างพลังงานของร่างกายปลาด้วย (Suresh, 1995) ส่วนในปลา Nile Tilapia นั้น แคดเมียมจะลดขบวนการ glycolysis และลดปริมาณโปรตีนในตับลง (Almeida, 2001)

การสะสมพิษของแคดเมียมในปลาโดยทั่วไปมีการศึกษายืนยันว่าพบในอวัยวะภายในมากกว่ากล้ามเนื้อ เช่นการเลี้ยงปลา *Atlantic salmon* โดยให้อาหารผสมแคดเมียม จึงทำให้มีแคดเมียมสะสมในตับมากที่สุด รองลงมาคือทางเดินอาหารและเหงือก (Lundebye, 1999) โดยทั่วไปปริมาณโลหะหนักที่สะสมในกล้ามเนื้อปลาจะไม่มีความสัมพันธ์กับความยาวของปลา (Gaspic et al, 2002) แต่มีความสัมพันธ์กับเพศ โดยในปลา *Lethrinus lentjan* เพศเมียจะสะสมมากกว่าเพศผู้ (Al-Yousof, 2000) แต่วิธีการที่ปลาได้รับแคดเมียมจะไม่มีผลทำให้สัดส่วนการสะสมในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายสัตว์น้ำต่างกัน โดยพบว่าปลาที่ได้รับแคดเมียมโดยการกินอาหารและรับโดยสัมผัสสารละลายแคดเมียมโดยตรงจะมีสัดส่วนการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ใกล้เคียงกันยกเว้นที่เหงือก ปลาที่สัมผัสสารละลายแคดเมียมโดยตรงจะมีปริมาณแคดเมียมมากกว่า (Kraal, 1995)

เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและดินจากระบบการทดลองต่าง ๆ : เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในสิ่งมีชีวิตจากทุกระบบการทดลองในการศึกษาครั้งนี้ คือระบบที่สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดสัมผัสสารละลายแคดเมียมโดยตรง (แยกสิ่งทดลอง) ระบบที่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดรวมกับในระบบเดียว (ผสมไม่ไต่ดิน) ระบบที่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดรวมกันและมีดินในระบบหรือระบบนิเวศทางน้ำจำลอง (ผสม ไต่ดิน) และการถ่ายทอดแคดเมียมจากน้ำ แพลงก์ตอนพืช (*Chlorella*) แพลงก์ตอนสัตว์ (ไรแดง) ปลา ผ่านทางห่วงโซ่อาหารจำลอง (ห่วงโซ่อาหาร) (ตารางที่ 7,8) พบว่าโดยรวมแล้วปริมาณแคดเมียมที่สะสมในสิ่งมีชีวิตชุดแยกสิ่งทดลองจะมีปริมาณแคดเมียมสะสมอยู่สูงที่สุด ส่วนระบบที่รองลงมาคือผสมไม่ไต่ดินและผสมไต่ดิน เนื่องจากเมื่อมีสิ่งทดลองหลายชนิดมารวมกัน แต่ละชนิดสามารถดูดซับแคดเมียมได้จึงช่วยกันดูดซับแคดเมียม ปริมาณแคดเมียมที่สะสมจึงลดลง โดยเฉพาะระบบที่ไต่ดิน ดินช่วยในการดูดซับได้มีประสิทธิภาพสูงมาก ยกเว้นในปลา ในชุดทดลองผสมไต่ดิน (แคดเมียม 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีปริมาณแคดเมียมในเนื้อปลาสูงกว่าชุดผสมไม่ไต่ดิน ซึ่งเนื่องมาจากปลาว่ายอยู่ในภาชนะทดลองและกวนตะกอนดินฟุ้งขึ้นมาในน้ำ ทำให้ขณะที่ปลากรองน้ำนั้นมีตะกอนดินติดเข้าไปด้วย จึงทำให้ได้รับแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น โดยสรุปแล้วสิ่งที่ทำหน้าที่ดูดซับแคดเมียมเป็นหลักในระบบนิเวศทางน้ำจำลองนี้คือแพลงก์ตอนพืช รองลงมาคือดิน

สำหรับการถ่ายทอดแคดเมียมในห่วงโซ่อาหารพบว่าปริมาณแคดเมียมลดลงในลำดับขั้นสูงขึ้นไปในห่วงโซ่อาหาร คือพบปริมาณแคดเมียมใน *Chlorella* > ไรแดง > ปลา ซึ่งเทียบปริมาณแคดเมียมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่ถ้าพิจารณาแล้วการสะสมปริมาณแคดเมียมจะมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไรแดง 1 กรัม นั้นกิน *Chlorella* ปริมาณมากเป็นอาหาร และปลา 1 ตัว ซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก กินไรแดงจำนวนมากเป็นอาหาร ดังนั้นถ้าเทียบปริมาณแคดเมียมต่อน้ำหนักทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดที่มีในระบบย่อมพบปริมาณแคดเมียมในปลามากกว่าไรแดงและ *Chlorella*

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียม (ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง; ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ที่พบในสิ่งที่ทดลอง ในสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดทดลอง	<i>Chlorella</i>	<i>Moina</i>	ปลา	ดิน
-แยกสิ่งทดลอง	349.15 $\pm$ 2.97	55.35 $\pm$ 1.18*	1.43 $\pm$ 0.12 ไม่ตาย 3.53 $\pm$ 0.21 ตาย	4.89 $\pm$ 0.31 ผิว 0.87 $\pm$ 0.02 พื้นก้น
เกลือในน้ำ (mg/l)	0.021	0.017	0.164	0.010
-ผสม (ไม่ใส่ดิน)	162.6 $\pm$ 19.19	34.07 $\pm$ 8.11	0.15 $\pm$ 0.01 ไม่ตาย 0.62 $\pm$ 0.02 ตาย	-
เกลือในน้ำ (mg/l)	0.184			
-ผสม (ใส่ดิน)	81.60 $\pm$ 14.78	44.02 $\pm$ 2.63	1.54 $\pm$ 0.15	1.27 $\pm$ 0.1 ผิว 0.2 $\pm$ 0.03 พื้นก้น
เกลือในน้ำ (mg/l)	0.009			
-ห้วงโซ่อาหาร	194.0 $\pm$ 1.8	16.48 $\pm$ 2.23	0.117 $\pm$ 0.005 wet wt. 0.61 $\pm$ 0.02 dry wt.	-

*ทดลองในสารละลาย 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียม (ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง; ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ที่พบในสิ่งที่ทดลอง ในสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดทดลอง	<i>Chlorella</i>	<i>Moina</i>	ปลา	ดิน
-แยกสิ่งทดลอง	2530 $\pm$ 179.39	598.53 $\pm$ 32.88*	7.30 $\pm$ 2.25 ไม่ตาย 28.68 $\pm$ 8.44 ตาย	14.75 $\pm$ 1.96 ผิว 1.24 $\pm$ 0.07 พื้นก้น
เกลือในน้ำ (mg/l)	0.0236	0.071	2.151	0.294
-ผสม (ไม่ใส่ดิน)	510.14 $\pm$ 12.70	210.48 $\pm$ 17.36	8.35 $\pm$ 1.02 ไม่ตาย 45.63 $\pm$ 5.79 ตาย	-
เกลือในน้ำ (mg/l)	1.763			
-ผสม (ใส่ดิน)	586.18 $\pm$ 23.37	141.52 $\pm$ 26.74	1.98 $\pm$ 0.05	5.53 $\pm$ 0.26 ผิว 0.03 $\pm$ 0.001 พื้นก้น
เกลือในน้ำ (mg/l)	0.052			
-ห้วงโซ่อาหาร	1140.6 $\pm$ 20.06	56.6 $\pm$ 3.23	0.201 $\pm$ 0.013 wet wt. 1.05 $\pm$ 0.06 dry wt.	-

*ทดลองในสารละลาย 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเมียมที่พบในน้ำ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดินตะกอน

การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเมียมที่พบในน้ำ สิ่งมีชีวิต และดิน โดยใช้ข้อมูลจากระบบนิเวศทางน้ำจำลอง นำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS ตามสมการความสัมพันธ์ (correlation) ของ Pearson (Yap, 2002) พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีความสัมพันธ์ทางสถิติกับปริมาณแคลเมียมที่พบในแพลงก์ตอนพืช ($r=0.99$, $P<0.01$) แพลงก์ตอนสัตว์ ($r=0.83$, $P<0.01$) และดิน ($r=0.64$, $P<0.01$) ($n=18$) สำหรับปริมาณแคลเมียมที่พบในแพลงก์ตอนพืชมีความสัมพันธ์มากที่สุดกับแพลงก์ตอนสัตว์ ($r=0.872$, $P<0.01$) แต่ทั้งแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์มีความสัมพันธ์ในทางลบกับปริมาณแคลเมียมในปลา ($r=-0.879$ และ -0.728 , $P<0.01$ ตามลำดับ) ส่วนปริมาณแคลเมียมที่พบในแพลงก์ตอนพืชและดิน มีความสัมพันธ์ในทางลบกับน้ำ ($r=-0.32$) นั่นคือถ้าพบปริมาณแคลเมียมในแพลงก์ตอนพืชและดินมากจะพบในน้ำได้น้อย ซึ่งเนื่องมาจากระบบการทดลองนี้ได้รับแคลเมียมเพียงครั้งเดียวตอนเริ่มต้นการทดลอง แพลงก์ตอนพืชและดินตะกอนสามารถดูดซับแคลเมียมออกจากน้ำได้ปริมาณมาก จึงทำให้มีปริมาณแคลเมียมเหลือในน้ำอยู่น้อย จึงเกิดความสัมพันธ์ในทางลบ และเมื่อพิจารณาสิ่งมีชีวิตที่จะนำมาใช้เป็น bioindicator เพื่อบอกระดับความเป็นพิษของแหล่งน้ำแล้ว แพลงก์ตอนพืช *Chlorella* จะดีที่สุด เนื่องจากปริมาณแคลเมียมที่พบใน *Chlorella* มีความสัมพันธ์กับปริมาณแคลเมียมที่พบในน้ำมากกว่าสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ถึงแม้จะไม่ให้ความสัมพันธ์ที่เด่นชัดทางสถิติก็ตาม เพราะเนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เพียง 72 ชั่วโมง ผลของความสัมพันธ์จึงไม่เด่นชัดเท่าในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ได้รับโลหะหนักเข้าสู่แหล่งน้ำมาเป็นระยะเวลานานและได้รับอย่างต่อเนื่อง แต่จากการทดลองนี้สามารถชี้ให้เห็นว่าสิ่งที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเมียมในน้ำกับสิ่งมีชีวิตคือแพลงก์ตอนพืช

สรุป

ในระบบนิเวศน์ทางน้ำจำลองซึ่งประกอบด้วย น้ำ ดิน แพลงก์ตอนพืช (*Chlorella*) แพลงก์ตอนสัตว์ (ไรแดง) และปลาตก เมื่อได้รับแคดเมียมเข้าสู่ระบบ แคดเมียมจะลดลงอย่างรวดเร็วถึง 80 % ภายใน 30 นาทีแรกเท่านั้น โดยแคดเมียมไปสะสมอยู่ในแพลงก์ตอนพืชมากที่สุด รองลงมาคือ แพลงก์ตอนสัตว์ ดินตะกอน และปลา (เทียบต่อ 1 กรัม น้ำหนักแห้ง) โดยข้อมูลจากการทดลองในชุดที่แยกสิ่งทดลองออกเป็นชนิดเดียว ๆ และสัมผัสสารละลายแคดเมียมโดยตรงก็ให้ผลในแนวเดียวกัน และเมื่อทดลองนำแพลงก์ตอนพืชมาดูดซับแคดเมียมและนำไปเป็นอาหารแพลงก์ตอนสัตว์ และนำแพลงก์ตอนสัตว์ไปเป็นอาหารปลา พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่สะสมต่อกรัม น้ำหนักแห้งของสิ่งมีชีวิตลดลงตามขั้นการถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหาร และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองระบบนิเวศน์ทางน้ำมาหาความสัมพันธ์ของปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำกับที่พบในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบพบว่า ปริมาณแคดเมียมที่พบในแพลงก์ตอนพืชมีความสัมพันธ์สูงที่สุดกับปริมาณแคดเมียมในน้ำ

ความเห็นและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองครั้งนี้จะพบว่าในห่วงโซ่อาหารทางน้ำมีการถ่ายทอดพิษของแคดเมียมสู่สิ่งมีชีวิตในระดับที่สูงขึ้นไป โดยแพลงก์ตอนพืชในระบบเป็นตัวสะสมแคดเมียมได้มากที่สุด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงการสะสมแคดเมียมในสัตว์น้ำที่มีการกินแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหารโดยตรงด้วย ซึ่งคาดว่าจะสะสมแคดเมียมในปริมาณที่สูงกว่าสัตว์น้ำที่กินแพลงก์ตอนสัตว์ และยังพบได้ว่าดินตะกอนเป็นส่วนหนึ่งที่สะสมแคดเมียมไว้ได้ปริมาณมาก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงการสะสมของแคดเมียมในสิ่งมีชีวิตที่กินดินตะกอนหรืออาศัยอยู่ตามผิวหน้าดิน เช่น หอยต่าง ๆ ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Almeida, J.A., Novelli, E.L.B., Dal Pai Silva, M. and Alves Junior, R. Environmental cadmium exposure and metabolic responses of the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Environmental pollution. 114(2001):169-175.
- Al-Yousuf, M.H., El-Shahawi, M.S. and Al-Ghais, S.M. Trace metals in liver, skin and muscle of *Lethrinus lentjan* fish species in relation to body length and sex. The Science of the Total environment. 256(2000):87-94.
- AOAC. In P. Cunnif (Ed.). 1995. Official methods of analysis of AOAC International (Vol. I; 16 th ed.) Arlington, Virginia, USA:AOAC Int.
- Arnason, J.G. and Fletcher, B.A. A 40+year record of Cd, Hg, Pb and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA. Environmental Pollution. 123(2003):383-391.
- Baillieul, M. and Blust, R. Analysis of the swimming velocity of cadmium-stressed *Daphnia magna*. Aquatic Toxicology. 44(1999):245-254.
- Bambang, Y., Charmentier, G., Thuet, P., and Trilles, J.P. 1994. Effect of cadmium on survival and osmoregulation of various developmental stages of the shrimp *Penaeus japonicus* (Crustacea:Decapoda). Marien Biology. 123:443-450.
- Barata, C. and Baird, D.J. Determining the ecotoxicological mode of action of chemicals from measurements made on individuals: results from instar-base tests with *Daphnia magna* Straus. Aquatic Toxicology. 48(2000):195-209.
- Bervoets, L., Blust, R. and Verheyen, R. Accumulation of metals in the Tissues of Three Spined Stickelback (*Gasterosteus aculeatus*) from Natural Fresh Waters. Ecotoxicology and Environmental Safety. 48(2001), 117-127.
- Beurkens, J.E.M., Winkels, H.J., de Wolf, J., and Dekker, C.G.C. Trends in priority pollutants in the Rhine during the last 50 years. Water Science and Technology. 29(1994):77-85.
- Birmelin, C., Cuzin-roudy, J., Romeo, M., Gnassia-Barelli, M., and Puiseux-Dao, S. The mysid *Siriella ramata* as a test organism in toxicology : Effects of cadmium. Marine Environmental Research. 39(1995):317-320.
- Bodar, C.W. M., Van Der Sluis, I., Van Monfort, J.C.P., Voogt, P.A., and Zandee, D.I. Cadmium resistance in *Daphnia magna*. Aquatic Toxicology. 16(1990):33-40.

- Bordajandi, L.R., Gomez, G., Fernandez, M.A., Abad, E., Rivera, J. and Gonzalez, M.J. Study on PCBs, PCDD/Fs, organochlorine pesticides, heavy metals and arsenic content in freshwater fish species from the River Turia (Spain). *Chemosphere*. 53(2003):163-171.
- Bryan, F.W., Potts, F.W. and Forster, G.R. Heavy metals in the gastropod mollusc *Haliotis tuberculata*. *Journal of Marine Biology*. 57(1997):379-390.
- Caurant, F., Bustamante, P., Bordes, M. and Miramand, P. Bioaccumulation of cadmium, copper, and zinc in some tissues of three species of marine turtles stranded along the French Atlantic Coasts. *Marine Pollution Bulletin*. 38(1999):1085-1091.
- Chale, F.M.M. Trace metal concentrations in water, sediments and fish tissue from Lake Tanganyika. *The Science of the Total Environment*. 299(2002):115-121.
- Cheggour, M., Chafik, A., Langston, W.J., Burt, G.R., Benbrahim, S. and Texier, H. Metals in sediments and the edible cockle *Cerastoderma edule* from two Moroccan Atlantic lagoons: Moulay Bou Selham and Sidi Moussa. *Environmental Pollution*. 115(2001):149-160.
- Cinier, C. de C., Petit-Ramel, M., Faure, R., Garin, D., and Bouvet, Y. Kinetics of cadmium accumulation and elimination in carp *Cyprinus carpio* tissues. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C*. 122(1999):345-352.
- Cripe, G.M. Comparative acute toxicities of several pesticides and metals to *Mysidosos bahia* and postlarval *Panaeus duorarum*. *Environmental Toxicology Chemistry* 13(1994):1867-1872.
- Das, S. and Jana, B.B. In situ cadmium reclamation by freshwater bivalve *Lamellidens marginalis* from an industrial pollutant-fed river canal. *Chemosphere*. 52(2003):161-173.
- Dekker, T., Krips, O.E., and Admiraal, W. Life history changes in the benthic cladoceran *Chydorus piger* induced by low concentrations of sediment-bound cadmium. *Aquatic Toxicology*. 56(2002):93-101.
- Dutta, T.K. and Kaviraj, A. Acute toxicity of cadmium to fish *Labeo rohita* and copepod *Diaptomus forbesi* pre-exposed to CaO and KMnO₄. *Chemosphere*. 42(2001):955-958.
- Edwards, J.W., Edyvane, K.S., Boxall, V.A., Hamann, M. and Soole, K.L. Metal levels in Seston and Marine fish flesh near industrial and metropolitan centers in South Australia. *Marine Pollution Bulletin*. 42(2001):389-396.
- FAO. 1983. Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fishery products. FAO fishery circular No. 464, pp. 5-100.

- Fernanda, M.C., Vasconcelos, M.T., Sousa-Pinto, I., and Cabral, J.P.S.. Biomonitoring with benthic macroalgae and direct assay of heavy metals in seawater of the Opoto coast (Northwest Portugal). *Marine Pollution Bulletin*. 34(1997):1006-1015.
- Fleit, E. and Lakatos, G. Accumulative heavy metal patterns in the sediment and biotic compartments of the Tisza watershed. 140-141(2003):323-332.
- Forget, J., Pavillon, J.F., Menasris, M.R. and Bocquene, G. Mortality and LC₅₀ values for several stages of the marine copepod *Tigriopus brevicornis* (Muller) exposed to the metals arsenic and cadmium and the pesticides atrazine, carbofuran, dichlorvos, and malathion. *Ecotoxicology and Environmental safety*. 40(1998):239-244.
- Frache, R., Baffi, F., Dadone, A., and Zanicchi, G. The determination of heavy metals in the Liguarina Sea. I. The distribution of copper, cobalt, nickel, and cadmium in surface water. *Marine chemistry*. 4(1976):365-375.
- Gaspic, Z.K., Zvonaric, T., Vrgoc, N., Odzak, N. and Baric, A. Cadmium and lead in selected tissues of two commercially important fish species from the Adriatic sea. *Water Research*. 36 (2002):5023-5028.
- Guilhermino, L., Lopes, M.C., Carvalho, A.P. and Soares, A.M.V.M. Inhibition of acetylcholinesterase activity as effect criterion in acute tests with juvenile *Daphnia magna*. *Chemosphere*. 32(1996):727-738.
- Gunten, H.R., Sturm, M., Moser, R.N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations. *Environmental Science and Technology*. 31(1997):2139-2167.
- Hall Jr, L.W., Ziegenfuss, M.C., Anderson, R.D. and Lewis, B.L. The effect of salinity of the acute toxicity of total and free cadmium to a Chesapeake Bay copepod and fish. *Marine Pollution bulletin*. 30(1995):376-384.
- Hansen, J.A., Welsh, P.G., Lipton, J. and Suedkamp, M.J. The effects of long-term cadmium exposure on the growth and survival of juvenile bull trout (*Salvelinus confluentus*). *Aquatic Toxicology*. 58(2002):165-174.
- Hollis, L., McGeer, J.C., McDonald, D.G., and Wood, C.M. Effects of long term sublethal Cd exposure in rainbow trout during soft water exposure: implications for biotic ligand modeling. *Aquatic Toxicology*. 51(2000):93-105.
- Hulscher, T.E.M., Mol, G.A.J., Luers, F. 1992. Release of metals from polluted sediments in a shallow lake; quantifying resuspension. In: Hart, B.T., Sly, P.G. (Eds.), *Sediment/water*

- interactions; Proceedings of the Fifth International Symposium. *Hydrobiologia*. 235-236, 97-105.
- Hutchinson, T.H., Williams, T.D., and Eales, G.J. Toxicity of cadmium, hexavalent chromium and copper to marine fish larvae (*Cyprinodon variegatus*) and copepods (*Tisbe battagliai*). *Marine Environmental Research*. 38(1994), 275-290.
- Inthorn, D. 2001. Removal of heavy metal by using microalgae *In* Photosynthetic microorganisms in Environmental Biotechnology. Springer-Verlag Hong Kong Ltd, Hong-Kong. p.111-136.
- Jackson, S.R.W. and Julie, M. J. 1996. Environmental Science : The natural environment and human impact. Longman Singapor Publishers Ltd, Singapore. 370 pp.
- Jain, C.K. Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India. *Water Research*. 38(2004):569-578.
- Jonhson, M., and Gentile, J. Acute toxicity of cadmium, dopper, and mercury to larval American lobster (*Hommarus americanus*). *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology*. 22 (1979):258-265.
- Kaplan, D., Heimer, Y.M., Abeliovich, A. and Goldsvrough P.B. Cadmium toxicity and resistance in *Chlorella* sp. *Plant Science*. 109(1995):129-137.
- Knauer, G.A. and Martin, J.H. Seasonal variations of cadmium , copper, manganese, lead and zinc in water and phytoplankton in Monterey bay, California. *Limnology Oceanography*. 18 (1973):579-604.
- Koyama, J., Nanamori, N. and Segawa, S. Bioaccumulation of waterborne and dietary cadmium by Oval Squid, *Sepioteuthis lessoniana*, and its distribution among organs. *Marine Pollution Bulletin* 40(2000):961-967.
- Kraal, M.H., Kraak, M.H.S., De Groot, C.J., and Davids C. Uptake and tissue distribution of dietary and aqueous cadmium by carp (*Cyprinus carpio*). *Ecotoxicology and Environmental safety*. 31(1995):179-183.
- Kurokawa, A. and Tatsukawa, R. 1990. Distribution of Heavy metals in soils of Vellar River estuary. South India. In Proc. Am. Symp. Of the Soc of Environ. Sci., Japan, pp. 152. Toranomon, Tokyo.
- Le Dean, L., and Devineau, J. In search of standardisation : A comparison of toxicity bioassays on two marine crustaceans (*Palaemon serratus* and *Tigriopus brevicornis*). *Rev. Trav. Inst. Peches Marit*. 49(1987):187-198.

- Luckey, T.D., and Benugopal, B. 1977. Metal toxicity in mammals. Plenum Press, New York.
- Lundebye, A.K., Berntssen, M.H.G., Wendelaar Bonga, S.E. and Maage, A. Biochemical and Physiological responses in Atlantic Salmon (*Salmo salar*) following dietary exposure to copper and cadmium. Marine pollution Bulletin. 39(1999):137-144.
- Mansour, A.A. and Sidky, M.M. Ecotoxicological Studies. 3. Heavy metals contaminating water and fish from Fayoum Governorate, Egypt. Food Chemistry. 78(2002):15-22.
- Matsunaga, T., Takeyama, H., Nakao, T. and Yamazawa, A. Screening of marine microalgae for bioremediation of cadmium-polluted seawater. Journal of Biotechnology. 70(1999):33-38.
- Mc Henery, J.G., Saward, D., and Seaton, D.D. Lethal and sub-lethal effects of the salmon delousing agent dichlorvos on the larvae of the lobster (*Homarus gammarus*) and herring (*Clupea harengus*). Aquaculture. 98(1991):331-347.
- Menesveta, P. Total mercury in the foodchain of Bang Pra coastal Area, Cholburi. Journal Science Society Thailand. 2(1976):117-126.
- Michaels, E., Semsari, S., Bin, C. and De Meester, L. Effects of sublethal doses of cadmium on the phototactic behavior of *Daphnia magna*. Ecotoxicology and Environmental Safety. 47 (2000):261-265.
- Muller, J., Ruppert, H., Muramatsu, Y., and Schneider, J. Reservoir sediments- a witness of mining and industrial development (Malter Reservoir, Eastern Erzgebirge, Germany). Environmental Geology. 39(2000):1341-1351.
- Munshi, A.B., Yong-Quan, S., and Shao-Jing, L. Acute toxicities of copper, cadmium and Cu:Cd mixture to larvae of the shrimp *Penaeus penicillatus*. Chin. Journal of Oceanology and Limnology. 14(1996):170-174.
- Orchard, S.J., Holdway, D.A., Barata, C., and Van Dam, R.A. A rapid response toxicity test based on the feeding rate of the tropical cladoceran *Moinodaphnia macleayi*. Ecotoxicology and Environmental safety. 53(2002):12-19.
- Paulson, A.J., Feeley, R.A., Curl, H.C., and Gendron J.F. Behavior of Fe, Mn, Cu and Cd in the Duwamish River Estuary. Water research. 19(1984):633-641.
- Penttinen, S., Kukkonen, J. and Oikari, A. The kinetics of cadmium in *Daphnia magna* as affected by humic substances and water hardness. Ecotoxicology and Environmental Safety. 30(1995):72-76.
- Preston, E.M. The importance of ingestion in chromium-51 accumulation by *Crassostrea virginica*. Journal Marine Biology and Ecology. 6(1971):47-54.

- Prudent, M.S., Ichihashi, H., and Tatsukawa, R. Heavy metal concentration in sediments from Manila Bay, Philippines and inflowing rivers. *Environmental Pollution*. 86(1994):83-88.
- Raven, R.H., Berg, L.R. and Johnson, G.B. 1993. *Environment*. Saunders College Publishing, New York. 569 pp.
- Renfro, W.C., Fowler, S.W., Heyraud, M. and La Rosa, J. Relative importance of food and water in long term zinc-65 accumulation by marine biota. *Journal of Fisheries Research*. 32 (1975):1339-1345.
- Robinson, K.A., Baird, D.J. and Wrona, F.J. Surface metal adsorption on zooplankton carapaces: implications for exposure and effects in consumer organisms. *Environmental pollution*. 122(2003):159-167.
- Romeo, M. and Nicolas, E. Cadmium, copper, lead and zinc in three species of planktonic crustaceans from the East coast of Corsica. *Marine Chemistry*. 18(1986):359-367.
- Romeo, M., Siau, Y., Sidoumou, Z. and Gnassia-Barelli, M. Heavy metal distribution in different fish species from the Mauritania coast. *The Science of the Total Environment*. 232 (1999):169-175.
- Roper, J.M., Cherry, D.S., Simmers, J.W. and Tatem, H.E. Bioaccumulation of toxicants in the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, at the times beach confined disposal facility, Buffalo, New York. *Environmental Pollution*. 94(1991):117-129.
- Santojanni, A. Gorbi, G. and Sartore, F. Prediction of fecundity in chronic toxicity tests on *Daphnia magna*. *Water Research*. 32(1998):3146-3156.
- Semsari, S., Amar, H.A., Badani, Z. and Benayad, B. Study of the inhibition of certain trophic levels by the presence of metal cations in water. *Desalination*. 150(2002):177-188.
- Sindermann, D.J. 1996. *Ocean Pollution Effects on Living Resources and Humans*. CRC Press, London. 275 pp.
- Sobral, O., Chastinet, C., Nogueira, A., Soares, A.M.V.M., Goncalves, R. and Ribeiro, R. In Vitro development of parthenogenetic eggs: A fast ecotoxicity test with *Daphnia magna*?. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 50(2001):174-179.
- Storelli, M.M., Storelli, A. and Marcotrigiano, G.O. Heavy metals in the aquatic environment of the Southern Adriatic Sea, Italy : Macroalgae, sediments and benthic species. *Environment International*. 26(2001):505-509

- Suresh, A., Sivaramakrishna, B., and Radhakrishnaiah, K. Cadmium induced changes in ion levels and ATPase activities in the muscle of the fry and fingerlings of the freshwater fish, *Cyprinus carpio*. *Chemosphere*. 30(1995):367-375.
- Sydeman, W.J. and Jarman, W.M. Trace metals in seabirds, steller sea lion, and forage fish and zooplankton from central California. *Marine Pollution Bulletin*. 36(1998):828-832.
- Tayal, A.K., Kaur, I. And Mathur, R.P. Bioaccumulation and localization of exogenous cadmium in a teleost by electron microscopy (TEM) and its specific quantitation by electron probe X-ray microanalysis (EPMA). *Bioorganic and Medicinal Chemistry*. 8(2000):475-482.
- Taylor, M.D. and Percival, H.J. Cadmium in soil solutions from a transect of soils away from a fertiliser bin. *Environmental Pollution*. 113(2001):35-40.
- Wangersky, P.J. Biological control of trace metal residence time and speciation. *Marine chemistry*. 18(1986):269-297.
- Wilber, C.G. 1971. The biological aspects of water pollution. Thomas Publisher, Illinois. p.58-72.
- Yap, C.K., Ismail, A. , Tan, S.G. and Omar, H. Correlations between speciation of Cd, Cu, Pb and Zn in sediment and their concentrations in total soft tissue of green-lipped mussel *Perna viridis* from the west coast of Peninsular Malaysia. *Environment International*. 28(2002):117-126.
- Zanders, I. P., and Rojas, W.E. Cadmium accumulation, LC_{50} and oxygen consumption in the tropical marine amphipod *Elasmopus rapax*. *Marine Biology*. 113(1992):409-413.
- Zhou, H.Y., Cheung, R.Y.H., Chan, K.M. and Wong, M.H. Metal concentrations in sediments and Tilapia collected from inland waters of Hong Kong. *Water Research*. 32(1998):3331-3340.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2540. บันทึกสำเนารายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ. หน้า 1-36.
- กรมประมง. 2535. ภาพปลาและสัตว์น้ำของไทย. กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 325 หน้า.
- พรสวรรค์ มหาโชคเลิศวัฒนา. 2529. การกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่โดยวิธีตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- พัชรา เพ็ชรพิรุณ. 2531. ปริมาณโลหะหนักบางชนิดในห่วงโซ่อาหารของหมึกและปลาถิ่นที่พบบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระยอง จันทบุรี และตราด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

- ภาณุ เทวรัตน์มณีกุล, ทวี วิพุทธานุมาศ, วีระ วัชรกรโยธิน และ ทศนีย์ สุขสวัสดิ์. 2532. การเพาะเลี้ยงไรแดง. เอกสารเผยแพร่ฉบับที่ 9-2532. สถานีประมงน้ำจืดจังหวัดปทุมธานี. กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 14 หน้า.
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2539. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 131 หน้า.
- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542. แพลงก์ตอนพืช. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 70 หน้า.
- สุชาดา มะแสง. การสะสมของแคดเมียมและปรอทในผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ. วารสารการประมง. 50 (2540):40-47.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณแคดเมียมที่พบในดินระดับความลึกต่าง ๆ ในชุดทดลองดินสัมผัสกับสารละลายแคดเมียมโดยตรง

ระดับความลึก (ซม.)	Cd (ug/g dry wt)	
	แคดเมียมเริ่มต้น 0.35 mg/l	แคดเมียมเริ่มต้น 3.5 mg/l
1	4.890±0.311	14.755±0.965
2	1.610±0.195	1.642±0.160
2-4	1.490±0.062	1.406±0.007
4-6	1.061±0.041	1.289±0.035
6-8	0.984±0.044	1.139±0.029
8-10	0.870±0.028	1.243±0.071

(ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n=9)

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณแคดเมียมที่พบในดินระดับความลึกต่าง ๆ ในชุดทดลองที่ผสมสิ่งมีชีวิตทุกชนิด

ระดับความลึก (ซม.)	Cd (ug/g dry wt)	
	แคดเมียมเริ่มต้น 0.35 mg/l	แคดเมียมเริ่มต้น 3.5 mg/l
1	1.276±0.104	5.539±0.267
2	1.094±0.098	0.829±0.139
2-4	0.456±0.049	0.571±0.273
4-6	0.233±0.105	0.415±0.373
6-8	0.217±0.058	0.053±0.732
8-10	0.208±0.036	0.038±0.036

(ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n=9)

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณแคดเมียมในเนื้อปลาที่ได้รับอาหารปนเปื้อนแคดเมียม (ไรแดงซึ่งกิน *Chlorella* สัมผัสแคดเมียม 0, 0.35 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในระยะเวลาการเลี้ยงที่แตกต่างกัน

ระยะเวลา (วัน)	Cd ($\mu\text{g/g}$ dry wt.) ในชุดทดลองต่าง ๆ (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n=9)			ความแตกต่างทางสถิติ ระหว่างความเข้มข้น*			ความแตกต่างทางสถิติ ระหว่างวันในทรีทเมนต์เดียวกัน**		
	0 mg/l	0.35 mg/l	3.5 mg/l	0 mg/l	0.35 mg/l	3.5 mg/l	0 mg/l	0.35 mg/l	3.5 mg/l
0	0.062 $\pm$ 0.026	0.062 $\pm$ 0.026	0.062 $\pm$ 0.026	a	a	a	A	A	A
3	0.062 $\pm$ 0.026	0.200 $\pm$ 0.019	0.257 $\pm$ 0.044	a	b	b	AB	B	B
7	0.067 $\pm$ 0.021	0.224 $\pm$ 0.018	0.272 $\pm$ 0.041	a	b	b	AB	BC	B
10	0.072 $\pm$ 0.014	0.299 $\pm$ 0.015	0.291 $\pm$ 0.050	a	b	b	AB	BCD	B
15	0.091 $\pm$ 0.018	0.314 $\pm$ 0.023	0.316 $\pm$ 0.030	a	b	b	ABC	CD	B
20	0.119 $\pm$ 0.038	0.325 $\pm$ 0.033	0.324 $\pm$ 0.100	a	b	b	ABCD	CDE	B
25	0.146 $\pm$ 0.055	0.363 $\pm$ 0.028	0.373 $\pm$ 0.061	a	b	b	BCD	DE	B
30	0.163 $\pm$ 0.062	0.380 $\pm$ 0.078	0.580 $\pm$ 0.081	a	b	c	BCD	DE	C
40	0.174 $\pm$ 0.052	0.389 $\pm$ 0.028	0.598 $\pm$ 0.067	a	b	c	BCD	DE	C
50	0.174 $\pm$ 0.066	0.433 $\pm$ 0.028	0.618 $\pm$ 0.023	a	b	c	CD	E	C
60	0.174 $\pm$ 0.036	0.610 $\pm$ 0.024	1.047 $\pm$ 0.068	a	b	c	D	F	D

* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (เทียบเวลาเดียวกัน ระหว่างชุดทดลอง)

** ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (เทียบในชุดทดลองเดียวกัน ระหว่างระยะเวลาในการเลี้ยง)

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

ขณะนี้ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จสิ้นยังอยู่ระหว่างเตรียมการตีพิมพ์ โดยต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติได้เตรียมเสร็จสิ้นแล้วประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และอยู่ระหว่างการตรวจทานของนักวิจัยที่ปรึกษา ซึ่งเมื่อผลงานได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ทางผู้วิจัยจะแจ้งให้ สกว. ทราบทันที

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

เชิงวิชาการ: ได้มีการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ที่สามารถทำงานวิจัยเพื่อนำเสนอ หรือตีพิมพ์งานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติได้ รวมทั้งได้ความรู้ทางวิชาการเกี่ยวกับการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในแหล่งน้ำว่าการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสรุปถึงระดับความปลอดภัยของแหล่งน้ำนั้น ๆ รวมถึงการบริโภคสัตว์น้ำในแหล่งน้ำเหล่านั้นได้ เนื่องจากพบว่าสัตว์น้ำสามารถสะสมโลหะหนักในเนื้อได้มากกว่าโลหะหนักที่พบในน้ำหลายเท่า ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำเสนอผลงานและข้อเสนอแนะเหล่านี้ในวารสารวิจัยภายในประเทศเพื่อเผยแพร่ให้บุคลากรหน่วยงานต่าง ๆ ภายในประเทศได้รับทราบข้อเสนอแนะเหล่านี้

บทความสำหรับการเผยแพร่

การเพิ่มขึ้นของประชากรและการพัฒนาประเทศในปัจจุบันส่งผลให้มีการขยายตัวของแหล่งชุมชน และมีการพัฒนาวิธีการเพิ่มผลผลิตทางด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม เพื่อรองรับความต้องการในการอุปโภค บริโภคของมนุษย์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดปัญหาหลากหลายต่าง ๆ ขึ้น ปัญหาที่ปรากฏชัดคือปัญหามลภาวะทางน้ำ เช่นเกิดการเน่าเสียของน้ำเนื่องจากการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งเกษตรกรรม ฟาร์มสัตว์น้ำ เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำเนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำทิ้งระบายจากแหล่งเกษตรกรรมที่มีการใช้สารฆ่าแมลง สารกำจัดศัตรูพืช ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งคือปัญหาการสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ ซึ่งแหล่งที่มาของโลหะหนักเหล่านี้โดยมากปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการเกษตรซึ่งมีส่วนผสมของโลหะหนัก หรือมาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่นร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ ล้วนแต่เป็นผลทำให้มีการแพร่กระจายของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ และสิ่งที่ควรตระหนักอย่างยิ่งคือโลหะหนักเมื่อลงสู่แหล่งน้ำนั้นไม่มีการสลายตัวไป แต่ถูกดูดซับเข้าไปสะสมอยู่ในดินตะกอนและสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยอยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษชั่วคราว ดังนั้นเมื่อทำการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำจึงพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย แต่แท้จริงแล้วยังมีปริมาณโลหะหนักอยู่ในแหล่งน้ำนั้นมากกว่าที่ตรวจพบในน้ำหลายร้อยเท่า โดยโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้เหล่านั้นสามารถก่อให้เกิดอันตรายทันทีเมื่อสภาพทางกายภาพหรือทางเคมีของน้ำเปลี่ยนแปลง (เช่นพีเอชลดลง) แม้จะมีมาตรการในการควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำและมีการบังคับให้มีการบำบัดน้ำเสียก่อนแต่พบว่ายังมีการหลีกเลี่ยง ละเลย อีกทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดของหลายโรงงานยังไม่ดีพอ จึงทำให้ยังคงมีปริมาณโลหะหนักจำนวนมากถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

ในแหล่งน้ำมีโลหะหนักที่เป็นอันตรายปนเปื้อนอยู่หลายชนิด ซึ่งแคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่เป็นอันตรายสูง มีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำถึง 8,000 ตันต่อปี และสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งทำให้มนุษย์ที่บริโภคสัตว์น้ำได้รับอันตราย คือกระดูกอ่อนแอ แดกหักง่าย (โรคอิไต อิไต) เป็นมะเร็ง และระบบไตถูกทำลาย ซึ่งแคดเมียมปริมาณมากที่ลงสู่แหล่งน้ำนี้จะเหลือปรากฏในน้ำเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่ถูกดูดซับโดยดินตะกอนและสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งไม่ทราบถึงสัดส่วนที่แน่นอนว่าอยู่ในส่วนใดในปริมาณเท่าใด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงข้อมูลสัดส่วนการสะสมและการถ่ายทอดของแคดเมียมในห่วงโซ่อาหารเพื่อเป็นข้อมูลในการทำนายปริมาณแคดเมียมที่แท้จริงที่มีอยู่ในแหล่งน้ำและในห่วงโซ่อาหารแต่ละระดับและหาแนวทางป้องกันอันตรายจากโลหะหนักที่จะเกิดขึ้นต่อผู้บริโภค

จากการศึกษาการสะสมของแคดเมียมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในระบบที่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดและดินอยู่รวมกัน พบว่าปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลงอย่างรวดเร็วถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 30 นาทีแรก และมีการสะสมของแคดเมียมในแพลงก์ตอนพืชมากที่สุด รองลงมาคือแพลงก์ตอนสัตว์ และปลา และพบว่าการสะสมของแคดเมียมที่ระดับผิวดินสูงและเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินมีลดลง

โดยจากการทดลองแม้ความเข้มข้นของสารละลายแคเคเมียสูงถึง 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่เป็นอันตรายต่อปลา แต่ในการทดลองพบว่าไม่มีการตายของปลาเลย แสดงว่าแพลงก์ตอนพืช และดินที่มีในน้ำมีส่วนช่วยในการดูดซับปริมาณแคเคเมียออกไปจากสารละลายได้ดีจึงทำให้เป็นอันตรายต่อปลาลดลง

จากการจำลองระบบนิเวศทางน้ำในการทดลองนี้ ซึ่งมีการผสมรวม น้ำ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา และดินไว้ด้วยกัน พบว่าเมื่อใส่สารละลายแคเคเมียเข้มข้น 0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป เมื่อระยะผ่านไป 72 ชั่วโมง มีปริมาณเหลือใกล้เคียงกับเกณฑ์ที่กำหนดคือมีแคเคเมียเหลืออยู่ 0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ว่าในน้ำควรมีแคเคเมียไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาปริมาณแคเคเมียที่สะสมในเนื้อปลาจากชุดทดลองนี้ มีปริมาณถึง 1.54 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดให้มีในเนื้อปลาคือต้องไม่เกิน 0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ซึ่งแสดงว่าแม้พบว่าปริมาณแคเคเมียในน้ำมีน้อยใกล้เคียงค่ามาตรฐานปลอดภัยแต่แท้จริงแล้วปริมาณแคเคเมียที่มีอยู่ในสัตว์น้ำที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้นมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานปลอดภัยมาก

การสะสมของแคเคเมียในดินมีส่วนการสะสมที่ระดับผิวดิน 0-1 เซนติเมตร มากที่สุด และสัดส่วนการสะสมลดลงเรื่อย ๆ ตามระดับความลึกของดินที่เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายแคเคเมียที่สูงกว่าจะมีสัดส่วนการสะสมที่ผิวดินมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ การที่ดินตะกอนมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีโดยเฉพาะที่ผิวดิน มีปริมาณโลหะหนักสะสมอยู่เป็นปริมาณมาก ย่อมส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ตามผิวน้ำดิน โดยเฉพาะหอย ซึ่งล้วนกรองกินตะกอนในน้ำเป็นอาหาร โดยปริมาณโลหะหนักจากดินตะกอนสามารถถ่ายทอดไปยังสัตว์น้ำเหล่านั้นได้ ดังนั้นผู้ที่บริโภคสัตว์เหล่านั้นก็จะต้องระมัดระวังถึงการปนเปื้อนของโลหะหนักให้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณที่สะสมอยู่ในดินตะกอนนั้นมีสูงมากกว่าปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบในน้ำหลายเท่า

จากการศึกษาการถ่ายทอดแคเคเมียผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ ปริมาณแคเคเมียที่สะสมในไรแดงมาจากอาหารที่กินเข้าไปคือ *Chlorella* ที่มีแคเคเมียสะสมอยู่ ซึ่งแคเคเมียจะสะสมอยู่ในส่วนเนื้อเยื่อและทางเดินอาหารเป็นหลัก ซึ่งไรแดงนอกจากรับพิษของแคเคเมียผ่านทางกรกินอาหารแล้วยังสามารถรับแคเคเมียจากน้ำได้โดยตรง โดยการซึมผ่านเข้าเซลล์และการสะสมไว้ที่เปลือกคลอโรพลาสต์ซึ่งมีคุณสมบัติดูดซับโลหะหนักต่าง ๆ ได้ดี และไรแดงสามารถสะสมแคเคเมียไว้ที่ตัวได้ปริมาณมากกว่าที่พบในน้ำ ดังนั้นหากมีการนำไรแดงจากแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักมาใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์น้ำต่าง ๆ ย่อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำเหล่านั้น ถ้าไรแดงมีโลหะหนักสะสมอยู่ที่ตัวจำนวนมากก็必将ทำให้สัตว์น้ำที่กินไรแดงตายได้

จากการนำไรแดงที่มีแคเคเมียสะสมอยู่มาเป็นอาหารปลา เพื่อศึกษาการสะสมและถ่ายทอดแคเคเมียจากไรแดงสู่ปลาโดยผ่านทางกรกิน โดยเลี้ยงปลาเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าปริมาณแคเคเมียที่สะสมในเนื้อปลามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการได้รับอาหารนานขึ้น และปลาที่ได้รับไรแดงที่มีแคเคเมียในปริมาณสูงจะทำให้ส่วนเนื้อปลามีปริมาณแคเคเมียสูง โดยปริมาณแคเคเมียที่สะสมใน

เนื้อปลานั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกที่ได้รับอาหาร และเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าปริมาณแคดเมียมที่พบในส่วนเนื้อปลาซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการบริโภคนั้นมีปริมาณแคดเมียมสะสมอยู่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดไว้ ซึ่งในแหล่งน้ำธรรมชาติจริง ๆ แล้ว สัตว์น้ำหรือปลาจะถูกเลี้ยงนานกว่า 60 วัน ดังนั้นปริมาณโลหะหนักที่สะสมอยู่ในเนื้อปลาย่อมมีโอกาสที่จะสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานมาก

การสะสมแคดเมียมในเนื้อปลาคู่นี้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกินอาหารที่ปนเปื้อนแคดเมียม โดยปริมาณแคดเมียมในกล้ามเนื้อจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังได้รับอาหารที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียม เนื่องจากในช่วงแรกแคดเมียมส่วนใหญ่ไปสะสมอยู่ในอวัยวะภายในพวก ตับและไต โดยได้มีรายงานว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในอวัยวะภายในของสัตว์น้ำสูงมากกว่าที่สะสมในเนื้อหลายสิบเท่า ดังนั้นการบริโภคอวัยวะภายในของสัตว์น้ำที่อยู่ในแหล่งน้ำปนเปื้อนด้วยโลหะหนักย่อมได้รับอันตรายมากกว่าการบริโภคเนื้อสัตว์น้ำ

ส่วนวิธีการที่ปลาได้รับแคดเมียมจะไม่มีผลทำให้สัดส่วนการสะสมในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายสัตว์น้ำต่างกัน โดยพบว่าปลาที่ได้รับแคดเมียมโดยการกินอาหารและรับโดยสัมผัสสารละลายแคดเมียมโดยตรงจะมีสัดส่วนการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ใกล้เคียงกันยกเว้นที่เหงือก ปลาที่สัมผัสสารละลายแคดเมียมโดยตรงจะมีปริมาณแคดเมียมมากกว่า

โดยสรุปสำหรับการถ่ายทอดแคดเมียมในห่วงโซ่อาหารพบว่าปริมาณแคดเมียมลดลงในลำดับขั้นสูงขึ้นไปในห่วงโซ่อาหาร คือพบปริมาณแคดเมียมใน แพลงก์ตอนพืช > แพลงก์ตอนสัตว์ (ไรแดง) > ปลา ซึ่งเทียบปริมาณแคดเมียมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง แต่ถ้าพิจารณาแล้วการสะสมปริมาณแคดเมียมจะมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไรแดง 1 กรัม นั้นกินแพลงก์ตอนพืชปริมาณมากเป็นอาหาร และปลา 1 ตัว ซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก กินไรแดงจำนวนมากเป็นอาหาร ดังนั้นถ้าเทียบปริมาณแคดเมียมต่อน้ำหนักทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดที่มีในระบบย่อมพบปริมาณแคดเมียมในปลามากกว่าไรแดงและแพลงก์ตอนพืช

การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำ สิ่งมีชีวิต และดิน เพื่อพิจารณาส่งมีชีวิตที่จะนำมาใช้เป็น bioindicator เพื่อบอกระดับความเป็นพิษของแหล่งน้ำแล้ว แพลงก์ตอนพืช *Chlorella* จะดีที่สุด เนื่องจากปริมาณแคดเมียมที่พบใน *Chlorella* มีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำมากกว่าสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น

ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การตรวจวัดปริมาณโลหะหนักจากน้ำเพียงอย่างเดียวไม่สามารถระบุได้ว่าแหล่งน้ำนั้นมีความปลอดภัยหรือไม่ เนื่องจากปริมาณโลหะหนักที่พบในน้ำมีปริมาณต่ำกว่าที่พบในแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และดินตะกอนมาก และจากการทดลองพบว่าแม้ระดับแคดเมียมที่พบในน้ำอยู่ในค่าที่ปลอดภัย แต่ปริมาณแคดเมียมที่พบในเนื้อปลามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ปลอดภัยมาก และยังพบว่าการศึกษาหาชนิดสิ่งมีชีวิตที่จะใช้เป็นดัชนีบอกระดับความเป็นพิษของแคดเมียมในแหล่งน้ำนั้นค่อนข้างยาก เพราะเมื่อพบปริมาณโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ มาก นั่นคือจะพบในน้ำได้น้อย เพราะสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เหล่านั้นดูดซับโลหะหนักไปสะสมไว้ในตัวมาก