วิทยานิพนธ์

จลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85
สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และ โครเมียม-51
ในหอยแครง (*Anadara granosa*)

BIOACCUMULATION KINETICS OF MERCURY-203,
CESIUM-134, STRONTIUM-85, ZINC-65, COBALT-57 AND
CHROMIUM-51 IN COCKLE (*Anadara granosa*)

นายนิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2551

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป	รังสีประยุกต์และไอโซโทป
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง จลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และ โครเมียม-51 ในหอยแครง (*Anadara granosa*)

Bioaccumulation Kinetics of Mercury-203, Cesium-134, Strontium-85, Zinc-65, Cobalt-57 and Chromium-51 in Cockle (*Anadara granosa*)

นามผู้วิจัย นายนิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ ....

(อาจารย์สมจิตต์ ปาละกาศ, Ph.D.)

กรรมการ ....

(รองศาสตราจารย์พรรณี พักคง, M.S.)

กรรมการ ....

(อาจารย์ขนิษฐา ศรีสุขสวัสดิ์, วศ.ม.)

กรรมการ ....

(รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษ์พงศธร, D.Tech.Sci.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

จลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57
และโครเมียม-51 ในหอยแครง (*Anadara granosa*)

Bioaccumulation Kinetics of Mercury-203, Cesium-134, Strontium-85, Zinc-65, Cobalt-57
and Chromium-51 in Cockle (*Anadara granosa*)

โดย

นายนิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)
พ.ศ. 2551

นิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ 2551: จลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และ โครเมียม-51 ในหอยแครง (*Anadara granosa*) ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขาวิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ประธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์สมจิตต์ ปาละกาศ, Ph.D. 125 หน้า

การประยุกต์เทคนิคตามรอยรังสีเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134 ทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และโครเมียม-51 ในหอยแครง (*Anadara granosa*) เป็นการศึกษาโดยการจำลองแบบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความเข้มข้นกัมมันตภาพ เท่ากับ 0.2311, 1.370, 0.910, 1.7756, 0.0521 และ 2.3666 เบ็กเคอเรลต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้น ได้ศึกษาการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครงโดยนำหอยแครงจากการศึกษาการสะสมมาเลี้ยงในสภาพที่มีการเติมน้ำทะเลตลอดเวลาเป็นเวลา 59 วัน

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมนิวไคลด์ต่างๆ ไม่พบการสะสมของซีเซียมและสทรอนเชียม แต่หอยแครงสามารถสะสมปรอท สังกะสี โคบอลต์และโครเมียม ได้ดี โดยจลนพลศาสตร์การสะสมโคบอลต์ สังกะสีและโครเมียมมีรูปแบบ one-component first-order kinetic model และมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลด้วยระยะเวลา 30.4 , 16 และ 26 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าองค์ประกอบความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 729, 89.7 และ 23.6 ตามลำดับ สำหรับปรอทมีรูปแบบจลนพลศาสตร์การสะสมแบบเชิงเส้นมีค่าองค์ประกอบความเข้มข้นที่เวลา 26 วัน เท่ากับ 166.0 เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของธาตุที่มีการสะสมในตัวหอย พบว่าโคบอลต์และโครเมียมสะสมมากที่เปลือก ส่วนปรอทสะสมที่อวัยวะทั้งตัวเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่สังกะสีมีการสะสมที่เปลือกและเนื้อใกล้เคียงกัน

จลพลศาสตร์การขับโคบอลต์ ปรอทและสังกะสี รูปแบบ two-component exponential model โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีอย่างรวดเร็วเท่ากับ 5.8, 5.1 และ 8 วัน และค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกอย่างช้าเท่ากับ 124.6, 99.2 และ 118.6 วัน ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการคงอยู่ร้อยละ 76.1, 87.7 และ 16.6 ตามลำดับ ส่วนจลนพลศาสตร์การขับโครเมียมเป็นแบบ one-component exponential model โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกเท่ากับ 15 วัน

ภาพรวมของการศึกษาแสดงให้เห็นว่า หอยแครงสามารถสะสมโครเมียม โคบอลต์ ปรอทและสังกะสีได้ดีและคงอยู่ในตัวเป็นระยะเวลานาน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้หอยแครงเป็นดัชนีชีวภาพสำหรับการติดตามตรวจสอบและการประเมินระดับคุณภาพน้ำของสภาวะแวดล้อมชายฝั่งทะเล

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Nikom Prasertchiewchan 2008: Bioaccumulation Kinetics of Mercury-203, Cesium-134, Strontium-85, Zinc-65, Cobalt-57 and Chromium-51 in Cockle (*Anadara granosa*). Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Mr. Somchit Palakas, Ph.D. 125 pages.

In this study, radiotracer technique was applied to determine the bioaccumulation kinetics of mercury-203, cesium-134, strontium-85, zinc-65, cobalt-57 and chromium-51 in cockle (*Anadara granosa*). The laboratory experiments consisted of two parts; the uptake experiments with the activity concentrations of respective radionuclides of 0.2311, 1.7756, 2.3666, 1.370, 0.910 and 0.0521 Bq/ml. Following to the uptake experiment, depuration experiments were conducted under continuous flow seawater system.

The study on bioaccumulation kinetics of these radioisotopes revealed that, no accumulation of cesium-134 and strontium-85 but *A. granosa* could efficiently accumulate mercury-203, zinc-65, cobalt-57 and chromium-51. The uptake biokinetics of cobalt, zinc and chromium showed tendencies to reaching saturation at 30.4, 16 and 26 d and were well fitted to one-component first-order kinetic model with the estimated concentration factors of 729, 89.7 and 23.6, respectively. Bioaccumulation of mercury exhibited linear model with the estimated concentration factors of 166.0. Distribution study of radioisotopes showed that mostly of cobalt and chromium accumulated in shell, mercury mainly accumulated in visceral mass whereas zinc showed the similarity of accumulation in shell and visceral mass.

Regarding depuration experiment, loss of cobalt-57, mercury-203 and zinc-65 from cockle exhibited two-component exponential model with the calculated biological half life of the short components of 5.8, 5.1 and 8 days, respectively, and that of the long components was 124.6, 99.2 and 118.6 days, respectively. Retention efficiency of these radioisotopes was 76.1, 87.7 and 166 %, respectively. Loss of chromium-51 exhibited one-component exponential model with the calculated biological half life of 15 days.

Since, *A. granosa* could efficiently accumulate mercury, zinc, cobalt and chromium with long retention time. In conclusion, this cockle could be used as a bioindicator for environmental monitoring these radioisotopes and for assessment of coastal water quality

_______________________________ _______________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ดร.สมจิตต์ ปาละกาศ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.พรรณี พักคง อาจารย์ ขนิษฐา ศรีสุขสวัสดิ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก รศ.ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงศธร กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัยตลอดจน การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จและขอกราบขอบพระคุณ ดร.ปิยภรณ์ สมสมัคร ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ข้อคิดเห็นจนทำให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านจากภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ที่ถ่ายทอดความรู้และสร้างเสริมทัศนคติที่ดีในด้านต่างๆ แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่อการเรียนมาโดยตลอด

วิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณบางส่วนจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ในการจัดหาวัสดุ สารเคมี สารกัมมันตรังสีและได้รับงบประมาณบางส่วนจาก สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในด้านค่าใช้จ่ายอื่นๆ ตลอดจน อุปกรณ์และเครื่องมือวัดกัมมันตภาพรังสี

ขอขอบคุณ คุณสุทัศน์ เที่ยงตรงจิตต์ ผู้จัดการศูนย์จัดการกากกัมมันตรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในการเพิ่มพูนความรู้ทางการศึกษา ขอขอบคุณ คุณอนันต์ โอมณี พนักงานห้องทดลองของกลุ่มวิจัยของสถาบันที่ให้ความช่วยเหลือในงานด้านเทคนิคต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และขอบคุณพี่ชาย พี่สาวและน้องสาว ตลอดจนเพื่อนๆ ร่วมชั้นเรียนที่เป็นกำลังใจในด้านการเรียนตลอดมา

นิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ

พฤษภาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	26
การวิเคราะห์ข้อมูล	42
ผลและการวิจารณ์	47
ผล	47
วิจารณ์ผล	67
สรุปและข้อเสนอแนะ	76
สรุป	76
ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	90

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	ค่าครึ่งชีวิต ระดับพลังงานและความเข้มข้นกัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้ในการทดลอง	34
2	ค่ากัมมันตภาพรังสีรวมของตัวอย่างมาตรฐาน	37
3	ขีดกำจัดล่างของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสี	39
4	ประสิทธิภาพการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสี	39
5	ค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง	49
6	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ที่สะสมที่เปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ของหอยแครงจากการทดลองรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 26 วัน	57
7	ร้อยละของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และ ปรอท-203 ที่สะสมในส่วนเปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ของหอยแครงจากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 26 วัน	57
8	ค่า CF ของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65และปรอท-203 ของเปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน	58
9	ค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง	61

ตารางผนวกที่

1	ขนาดและน้ำหนักของหอยแครงสำหรับการทดลอง	92
2	น้ำหนักของเปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ของหอยแครง	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ตารางผนวกที่		หน้า
3	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ที่สะสมในตัวหอยแครงการทดลองจากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 26 วัน	94
4	ค่า CF ของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง เป็นระยะเวลา 26 วัน	100
5	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครง จากการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 59 วัน	102
6	ร้อยละของปริมาณโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงจากการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 59 วัน	107
7	สูตรอาหารสารละลายเอฟของกิลลาร์ด (Guillard F medium) ที่ระดับความเข้มข้น F/2	110
8	ค่ากัมมันตภาพรังสีรวมของตัวอย่างมาตรฐาน	111
9	ค่าคงที่อัตราการรับโลหะหนักของหอยสายพันธุ์ต่างๆ	112
10	ค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับโลหะหนักของหอยสายพันธุ์ต่างๆ	113
11	การเปรียบเทียบค่า CF ของอวัยวะทั้งตัว เปลือกและฮีโมลิมฟ์	113

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างการใช้เทคนิคตามรอยรังสีเพื่อศึกษาระบบ	4
2	การเกิดไอออนในเซชันและกลไกการเกิดคู่ไอออนของผลึกเจอมาเนียม	7
3	ระบบอุปกรณ์การวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา	9
4	กลไกการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต	16
5	ทางผ่านการได้รับโลหะหนักของสัตว์ทะเลไม่มีกระดูกสันหลังและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสะสมโลหะหนัก	17
6	ลักษณะการดำรงชีวิตของหอยสองฝา	19
7	การเตรียมน้ำทะเลสำหรับการทดลอง	26
8	การเลี้ยงหอยแครงในห้องปฏิบัติการ	27
9	การเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอน *I. galbanna*	29
10	การเตรียมแพลงก์ตอน *I. galbanna* เพื่อเป็นอาหารแก่สัตว์ทดลอง	30
11	ตู้ทดลองทางรังสีสำหรับการศึกษาการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี	33
12	น้ำทะเลกัมมันตรังสีมาตรฐาน	35
13	หอยแครงกัมมันตรังสีมาตรฐาน	35
14	อวัยวะทั้งตัวกัมมันตรังสีมาตรฐาน	36
15	การทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครง	40
16	การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาการกระจายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมในตัวหอยแครง	41
17	การทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง	42
18	ค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลตลอดระยะเวลาทดลองการรับสารนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน	47
19	น้ำหนักของหอยแครงตลอดระยะเวลาทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน	48
20	จลนพลศาสตร์การสะสมโครเมียม-51 ของหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
21	จลนพลศาสตร์การสะสมโคบอลต์-57 ของหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน	51
22	จลนพลศาสตร์การสะสมสังกะสี-65 ของหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน	52
23	จลนพลศาสตร์การสะสมปรอท-203 ของหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน	53
24	การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การสะสมของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65และปรอท-203 ของหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน	55
25	ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมที่เปลือก อวัยวะทั้งตัว และฮีโมลิมฟ์ของหอยแครงที่ระยะเวลาการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสู่ตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน	58
26	ค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลของการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง	60
27	น้ำหนักของหอยแครงตลอดระยะเวลาทดลองการรับสารกัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 59 วัน	60
28	ร้อยละของโครเมียม-51 ที่คงเหลือสะสมในตัวหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 59 วัน	63
29	ร้อยละของโคบอลต์-57 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 59 วัน	63
30	ร้อยละของสังกะสี-65 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 59 วัน	64
31	ร้อยละของปรอท-203 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 59 วัน	65
32	การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การขับโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ออกจากตัวหอยแครงในการเลี้ยงหอยเป็นระยะเวลา 59 วัน	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	สเปคตรัมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของหอยแครง กัมมันตรังสีมาตรฐาน	114
2	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับร้อยละของประสิทธิภาพ การวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของหอยแครง กัมมันตรังสีมาตรฐาน	114
3	สเปคตรัมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของอวัยวะทั้งตัว กัมมันตรังสีมาตรฐาน	115
4	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับร้อยละของประสิทธิภาพ การวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของอวัยวะทั้งตัว กัมมันตรังสีมาตรฐาน	115
5	สเปคตรัมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของน้ำทะเล กัมมันตรังสีมาตรฐาน	116
6	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับร้อยละของประสิทธิภาพ การวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของน้ำทะเล กัมมันตรังสีมาตรฐาน	116
7	ใบรับรองค่ากัมมันตภาพรังสีของสารละลายกัมมันตรรังสีรวมมาตรฐาน	117
8	การสะสมซีเซียม-137 ในแพลงก์ตอน 5 สายพันธุ์	118
9	การสะสมและการขับซีเซียม-137 ของหอยแมงลงภู่ *M. galloprovincialis* ในน้ำทะเล	119
10	การสะสมโคบอลต์-57 ของหอยแมลงภู่ *M. edulis*	120
11	การขับโคบอลต์-57 ออกจากตัวหอยแมลงภู่ *M. edulis*	121
12	การสะสมของโคบอลต์-57 ในส่วนอวัยวะทั้งตัวของแมลงภู่ *M. edulis* โดยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Autoradiography	122
13	การสะสมสังกะสี-65 ของหอยแมลงภู่ *M. edulis*	123
14	การขับสังกะสี-65 ออกของหอยแมลงภู่ *M. edulis*	124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}C$	=	องศาเซลเซียส
%	=	ร้อยละ
^{51}Cr	=	โครเมียม-51
^{57}Co	=	โคบอลต์-57
^{65}Zn	=	สังกะสี-65
^{203}Hg	=	ปรอท-203
C	=	ความเข้มข้นของมลสาร (ไมโครกรัมต่อกรัม)
k_u	=	ค่าคงที่อัตราการรับมลสารจากสภาวะน้ำทะเล (ลิตรต่อกรัมต่อวัน)
C_w	=	ความเข้มข้นของมลสารจากสภาวะน้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร)
AE	=	ประสิทธิภาพการคงอยู่จากสภาวะการกินอาหารที่มีมลสาร (Assimilation efficiency from ingested food)
IR	=	อัตราการกิน (ingestion rate) (ไมโครกรัมต่อกรัมต่อวัน)
C_f	=	ความเข้มของมลสารในอาหาร (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม)
k_e	=	ค่าคงที่อัตราจากการขับมลสารออก (ต่อวัน)
g	=	ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโต (ต่อวัน)
k_c	=	uptake rate constant (ต่อวัน)
t	=	เวลา (วัน)
k	=	อัตราการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกาย (ต่อวัน)
cm	=	เซนติเมตร
W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
A	=	กัมมันตภาพรังสี (เบ็กเคอเรล)
A_o	=	กัมมันตภาพรังสีที่เหลือสะสมที่ระยะเวลาเริ่มต้น
A_t	=	กัมมันตภาพรังสีที่เหลือสะสมที่เวลา t
λ	=	biological depuration rate constant (ต่อวัน)
λ_s	=	biological depuration rate constant ของการขับมลสารในช่วงที่ใช้เวลาสั้น (ต่อวัน)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

λ_l	=	biological depuration rate constant ของการขับมลสาร ในช่วงที่ใช้เวลานาน (ต่อวัน)
S	=	สัญลักษณ์กำกับส่วนของการขับมลสารออกด้วยระยะเวลาสั้นๆ (short component)
l	=	สัญลักษณ์กำกับส่วนของการขับมลสารออกโดยใช้ระยะเวลานาน (long component)
^{99m}Tc-DTPA	=	Technetium-99m labelled diethylenetriamine penta-acetate
^{99m}Tc	=	Technetium-99m
CF_{t26}	=	concentration factor วันที่ 26
CF_{eq}	=	concentration factor ที่สภาวะสมดุล
CF	=	concentration factor
$Tb_{1/2}$	=	biological half life
N	=	Non-linear model
L	=	Linear model
T	=	two-component loss model
O	=	one-component loss model
p-level	=	determination of adjustment
R^2	=	coefficient of determination
MeHg	=	methyle mercury
$Hg\ Cl_2$	=	mercury chloride
HgS	=	mercury sulfide
$CoCl_2$	=	cobalt chloride
Bq/ml	=	becquerel per milliliter
Bq/g	=	becquerel per gram
SE	=	asymptotic standard error
d	=	day
d^{1}	=	per day

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

IAEA	=	International Atomic Energy Agency
Kd	=	distribution coefficient
HPGe	=	high purity germanium
MCA	=	multichannel analyzer
ADC	=	analog-to-digital convertor
keV	=	kiloelectronvolt
LLD	=	lower limit of detection
exp	=	exponential
Ge	=	germanium
MT	=	metallothionine
MTLP	=	metallotrhionine-like-protein
SH-group	=	mercapto group
sd	=	standard deviation
nd	=	not detected
ppt.	=	part per thousand
A. granosa	=	*Anadara granosa*
I. galbanna	=	*Isochrysis galbanna*
A. senilis	=	*Anadara senilis*
P. viridis	=	*Perna viridis*
Mytilus edulis L.	=	*Mytilus edulis* Linnaeus
C. tulipa	=	*Crossostrea tulipa*
g	=	*gram*
µg	=	*microgram*
mg	=	*milligram*

จลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และ โครเมียม-51 ในหอยแครง (*Anadara granosa*)

Bioaccumulation Kinetics of Mercury-203, Cesium-134, Strontium-85, Zinc-65, Cobalt-57 and Chromium-51 in Cockle (*Anadara granosa*)

คำนำ

การศึกษาศักยภาพการสะสมมลสารของสิ่งมีชีวิตเพื่อใช้เป็นดัชนีทางชีวภาพบ่งชี้คุณภาพของสิ่งล้อมทางทะเล และงานศึกษาด้านจลนพลศาสตร์การสะสมมลสารในร่างกายของสิ่งมีชีวิตเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการพัฒนาแแบบจำลองการเคลื่อนย้ายของมลสารเข้าในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในทะเลได้รับความสนใจศึกษากันมาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ งานศึกษาที่ผ่านมาได้ให้ความสำคัญใน 3 ด้านคือ กลไกของการสะสมของมลสาร ปัจจัยที่มีต่อการรับมลสารเข้าสะสมในร่างกายและการเคลื่อนย้ายของมลสารสู่ห่วงโซ่อาหาร โดยแบบจำลองที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมามี 2 ลักษณะคือ แบบจำลองการสะสมมลสารที่มาจากวัฏภาคสารละลาย (dissolved phase) หรือทางน้ำทะเลและแบบจำลองการสะสมมลสารที่มาจากอาหาร (dietary phase) สำหรับข้อมูลสำคัญที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสะสมและการขับมลสารออก ได้แก่ ค่าองค์ประกอบความเข้มข้น (concentration factor: CF) ค่าคงที่อัตราการรับ (uptake rate constant) และคงที่อัตราการขับมลสาร (loss rate constant) รวมทั้งค่าประสิทธิภาพคงอยู่ (retention efficiency) ของมลสาร (Wang *et al.*, 1996, 2000; Hudson, 1998; Reinfelder, et *al.,* 1998; Ryan, 2002; Gungor *et al.*, 2001;)

ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency: IAEA) ได้ดำเนินการศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต่อการพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนย้ายมลสารประเภทโลหะหนักและนิวไคลด์กัมมันตรังสีไว้ ได้แก่ ค่า CF และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient: Kd) ของโลหะหนักและสารกัมมันตรังสี (IAEA, 2004) เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าว ได้มาจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมมลสารของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในสภาวะแวดล้อมเขตขั้วโลกและเขตอบอุ่น แต่ข้อมูลที่ศึกษาในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนยังมีน้อย กอปรกับการสะสมมลสารของสิ่งมีชีวิตนั้น มีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปัจจัยทางกายวิภาคของสิ่งมีชีวิต สภาวะแวดล้อมของที่อยู่อาศัย ทางผ่านของการ

เคลื่อนย้ายของมลสารและชนิดของสารประกอบทางเคมีของมลสาร เป็นต้น (Hutchin *et al*., 1998; Wang and Dei, 1999; Olivier *et al.,* 2002; Otchere *et al*., 2003)

หอยทะเลสองฝา (marine bivalve) เป็นสัตว์ทะเลชนิดหนึ่งที่พบว่า มีความสามารถในการสะสมมลสารและสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ชีวภาพได้ดี (Lagadic *et al*., 1998; Jamil, 2001) และหอยแครง (*A. granosa*) จัดเป็นหอยทะเลสองฝาชนิดหนึ่งที่พบมากตามชายฝั่งทะเลในพื้นที่เขตร้อน ประชาชนนิยมนำมาบริโภค การศึกษาข้อมูลด้านจลนพลศาสตร์ของการสะสมมลสารโดยหอยแครง จะทำให้ทราบถึงกลไกและความสามารถในการรับมลสารเข้าสะสม ระยะเวลาที่มลสารคงอยู่ในตัวหอย และรูปแบบการเคลื่อนย้ายมลสาร ที่สามารถนำมาประเมินความเหมาะสมในการใช้หอยแครงเป็นดัชนีทางชีวภาพ

การทดลองนี้ จะใช้เทคนิคตามรอยรังสี หรือ radiotracer technique ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการรับเข้าสะสมและการขับมลสารของหอยแครง (*A. granosa*) ตลอดจนกลไกการเคลื่อนย้ายของปรอท ซีเซียม สทรอนเชียม สังกะสี โครเมียมและโคบอลต์ผ่านทางน้ำทะเล โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้เป็นตัวตามรอยประกอบด้วยปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และโครเมียม-51 ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นและให้กัมมันตภาพรังสีแกมมาซึ่งสะดวกต่อการตรวจวัด

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาทางนิเวศวิทยารังสีและใช้หอยแครง (*A. granosa*) เป็นตัวแบบทางชีวภาพในการศึกษาการสะสมมลสารผ่านทางวัฏภาคสารละลาย โดยการจำลองสภาวะแวดล้อมของที่อยู่อาศัยในห้องปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท ซีเซียม สทรอนเชียม สังกะสี โคบอลต์ และโครเมียมในหอยแครง (*A. granosa*) โดยใช้เทคนิคตามรอยรังสี

2. เพื่อประเมินความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการใช้หอยแครงเป็นดัชนีทางชีวภาพในการติดตามตรวจสอบและประเมินระดับคุณภาพน้ำชายฝั่งทะเล

การตรวจเอกสาร

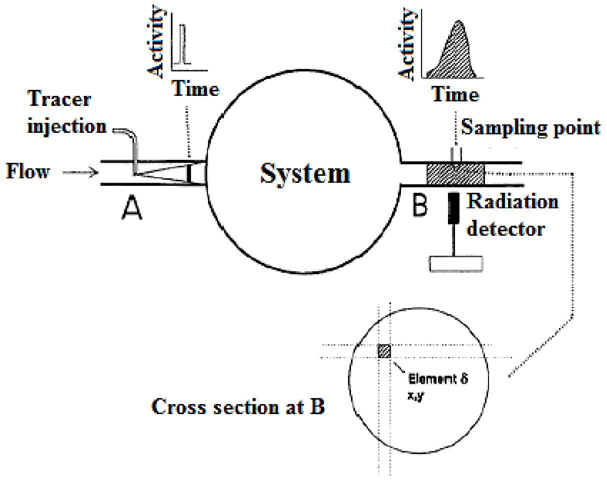
1. เทคนิคตามรอยรังสี (radiotracer technique)

1.1 หลักการ

เทคนิคตามรอยรังสี เป็นเทคนิคทางนิวเคลียร์ที่มีประสิทธิภาพและมีการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา ได้แก่ เคมี ชีววิทยา การเกษตร การแพทย์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมและทางอุตสาหกรรม โดยหลักการพื้นฐานของเทคนิคนี้ประกอบด้วย

1.1.1 การเติมสารละลายกัมมันตรังสีที่ทราบปริมาณซึ่งอาจอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายหรือในรูปการติดฉลากด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสารประกอบ (radioactive-labeled compound) ในระบบที่ต้องการศึกษาในเชิงพลวัต (dynamic)

1.1.2 การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีของสารกัมมันตรังสีตามรอยที่เคลื่อนย้ายในระบบ โดยอาจสัมพันธ์กับเวลา ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ หรือตำแหน่งการเคลื่อนย้ายของสารกัมมันตรังสีตามรอย ดังตัวอย่างในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการใช้เทคนิคตามรอยรังสีเพื่อศึกษาพลวัตน์ของระบบโดยเติมสารตามรอยรังสีที่ตำแหน่ง A และตรวจวัดที่ตำแหน่ง B

ที่มา: Kolbe (2007)

1.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคตามรอยรังสี

ตัวอย่างของเทคนิคตามรอยรังสี เช่น การนำนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยเข้าสู่ระบบโดยใช้วิธีติดฉลาก เช่น การใช้เทคนิเตียม-99m (^{99m}Tc) ในรูปสารเภสัชรังสี ^{99m}Tc-DTPA ฉีดเข้าในร่างกายผู้ป่วยเพื่อวินิจพยาธิสภาพของตับ หรือจะนำนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยผสมเข้ากับองค์ประกอบของระบบโดยตรง เช่น การฉีด $Na^{131}I$ เข้าไปผสมกับของเหลวภายในท่อในงานบำรุงรักษาท่อส่งของเหลวในโรงงานอุตสาหกรรม (IAEA, 1975; Nolan *et al*., 1992)

นอกจากนี้ ยังมีการนำเทคนิคตามรอยรังสีมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสะสมมลสารของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในระบบนิเวศของทะเล เช่น ปลาทะเล หอยทะเล หรือสาหร่ายทะเล เพื่อประเมินความสามารถของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ ในการเป็นดัชนีบ่งชี้ชีวภาพของการปนเปื้อนมลสารในสิ่งแวดล้อมชายฝั่งทะเล (Phillips, 1976; Wannua *et al.,* 1996; Fowler and Tessie, 1997)

การศึกษาระบบด้วยเทคนิคตามรอยรังสี อาจใช้ไอโซโทปรังสีที่ต้องผลิตขึ้นมา (artificial radionuclides) ได้แก่ โคบอลต์-57 โครเมียม-51และแคดเมียม-109 เป็นต้น หรืออาจใช้ไอโซโทปรังสีที่มีในธรรมชาติ (natural radionuclides) ได้แก่ คาร์บอน-13 ออกซิเจน-18 และไนโตรเจน-15 เป็นต้น

1.3 ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคตามรอยรังสี

แม้ว่า เทคนิคตามรอยรังสีจะมีประโยชน์และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายสาขา อย่างไรก็ตาม เทคนิคตามรอยรังสีย่อมมีทั้งข้อดีและข้อเสียเช่นเดียวกับเทคนิคอื่นๆ (Ritchie, 1987และ Kolbe, 2007) กล่าวคือ

1.3.1 ข้อดี

ก. การตรวจวัดไม่ส่งผลกระทบ (non-invasive) ต่อระบบที่ศึกษาซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีอย่างมากของเทคนิคนี้ ซึ่งแตกต่างจากเทคนิคการใช้สารตามรอยชนิดอื่น

ข. สามารถศึกษาระบบในเชิงพลวัต (dynamic) ในสถานะคงตัว (steady state) หรือในสภาวะสมดุลได้

ค. สามารถศึกษาการเคลื่อนที่และปรากฏการณ์แลกเปลี่ยนของธาตุซึ่งจะทำให้ทราบข้อมูลด้านสถานะภาพทางเคมีและฟิสิกส์ของธาตุที่เคลื่อนย้ายในระบบ

ง. ไม่ทำให้สถานะภาพของสถานะคงตัวเสียไป ซึ่งแตกต่างจากการใช้ stable isotopic tracer นั่นคือ เมื่อต้องการตรวจวัด ต้องนำตัวอย่างส่วนหนึ่งออกจากระบบมาตรวจวัด ซึ่งเป็นการรบกวนสถานะภาพคงตัว

จ. ใช้สารติดตามปริมาณน้อยมากได้ นั่นคือ สามารถดำเนินการทดลองกับระบบที่เกี่ยวข้องกับงานศึกษาทางวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ด้วยการใช้สารติดตามในปริมาณไม่เกินระดับที่มีในธรรมชาติ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบที่ศึกษา

ช. มีขั้นตอนดำเนินการไม่ซับซ้อนและข้อมูลที่ได้เข้าใจง่าย

ฉ. การตรวจวัดสะดวก รวดเร็วและไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

ช. สามารถทดลองในภาคสนามได้

ซ. มีความไวต่อการตรวจวัดดี

1.3.2 ข้อเสีย

ก. สารตามรอยรังสีแม้ว่าจะใช้ในปริมาณน้อยแต่มีราคาแพง

ข. ต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ในการปฏิบัติงานกับสารกัมมันตรังสี

ค. ต้องได้รับใบอนุญาตครอบครองและใช้สารกัมมันตรังสี

ง. เก็บไว้ใช้ในระยะยาวไม่ได้โดยเฉพาะนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยที่มีครึ่งชีวิตสั้นเพราะกัมมันตภาพรังสีสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จะต้องวางแผนการทดลองที่ดี

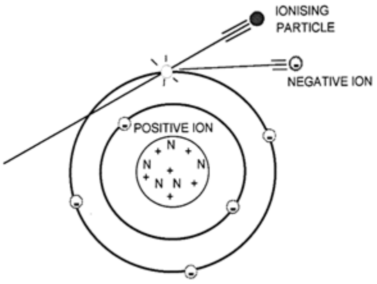
จ. มีความเสี่ยงได้รับอันตรายจากรังสีถ้าขาดความรู้ในด้านการป้องกันรังสี

2. การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมาด้วยหัววัด HPGe

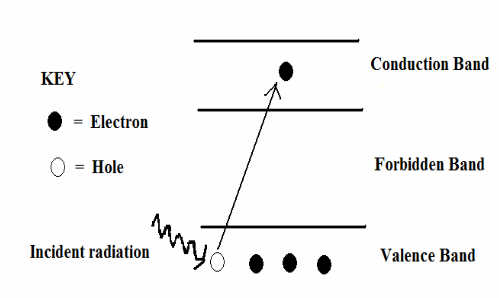
2.1 หลักการ

การวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีแกมมาที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยหัววัด High Purity Germanium (HPGe) ซึ่งเป็นหัววัดประเภทสารกึ่งตัวนำ มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อกัมมันตภาพรังสีแกมมาตกกระทบที่หัววัด หัววัดจะได้รับพลังงานจากรังสี โดยอะตอมของวัสดุของหัววัด (Ge) ไอออนไนเซชัน โดยการเกิดไอออนไนเซชันดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

อิเลคตรอนซึ่งปกติอยู่ในชั้นระดับพลังงาน valence band เมื่อได้รับพลังงานรังสีจะเคลื่อนที่ขึ้นไปอยู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้นคือ conduction band โดยเหลือช่องว่างที่ valence band ที่เรียกว่า hole ดังนั้น หลังการเกิดไอออนไนเซชันของหัววัดนี้ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ electron-hole pair หรือเปรียบได้กับการเกิดคู่ของไอออนขึ้นมา (ภาพที่ 2) โดยปริมาณคู่ไอออนที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณกัมมันตภาพรังสีและเมื่อให้ความต่างศักย์กับหัววัด คู่ไอออนจะเคลื่อนย้ายทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า (pulse) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 การเกิดไอออนไนเซชัน (ก) และกลไกการเกิดคู่ไอออนของผลึกเจอมาเนียม (ข)
ที่มา: IAEA and ANSTO (2006)

2.2 ระบบการวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา

ระบบการวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก (ภาพที่ 3) ดังนี้ (สุชิน, 2549)

2.2.1 หัววัดรังสีทำจากธาตุเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high purity germanium: HPGe) โดยเมื่อพลังงานของรังสีมาตกกระทบที่หัววัดจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับพลังงานที่หัววัดได้

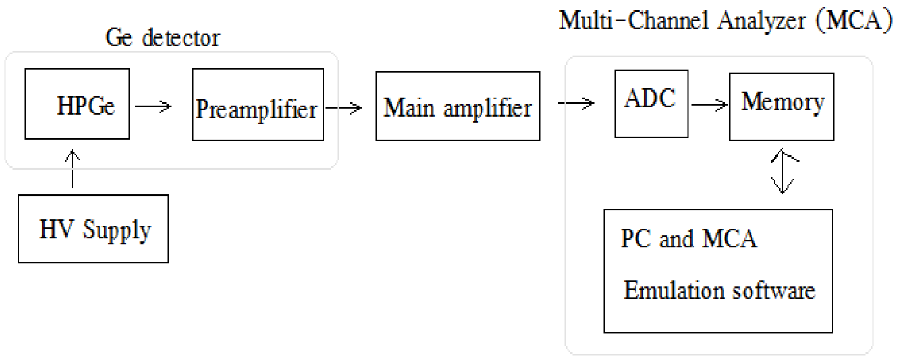
2.2.2 แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage power supply: HV supply) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงเพื่อกักเก็บตัวพาประจุที่เกิดขึ้นภายในผลึกเจอร์มาเนียม

2.2.3 ภาคขยายส่วนหน้า (pre-amplifier) ทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดและเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือสัญญาณพัลส์ (pluse) โดยขนาดของพัลส์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับประจุ

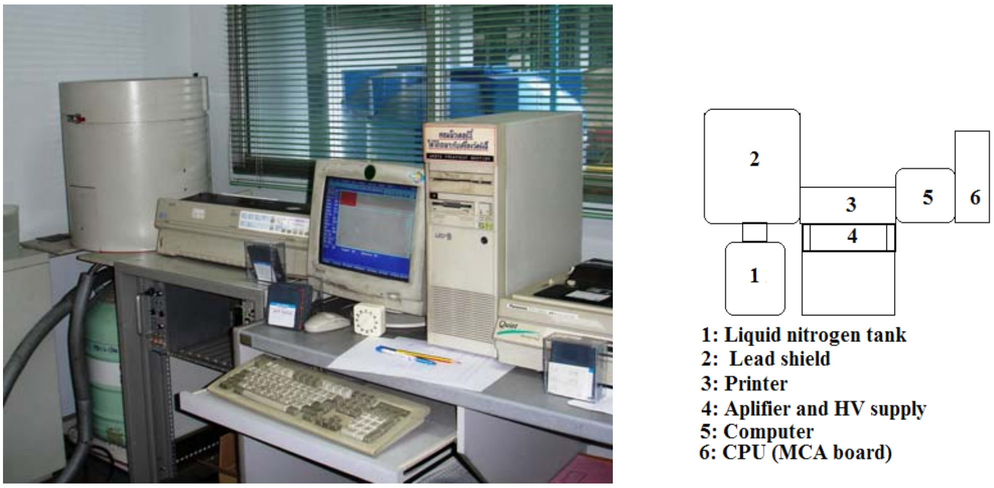
2.2.4 ภาคขยายหลัก (main amplifier) เป็นส่วนรับสัญญาณแล้วนำมาปรับแต่งรูปของสัญญาณ พร้อมกับขยายขนาดของสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ความสูงเอาท์พุทที่ได้จากภาคขยายหลัก

2.2.5 ADC (analog-to-digital convertor) ตัวเปลี่ยนความสูงของสัญญาณอนาลอกที่มาจากภาคขยายหลักให้เป็นสัญญาณดิจิตัล ซึ่งจะเป็นตัวระบุตำแหน่งการเก็บข้อมูลในหน่วยความจำของระบบ

2.2.6 อุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (multichannel analyzer: MCA) จะประกอบอยู่ในระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็น MCA board โดยใช้โปรแกมคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานรวมทั้งวิเคราะห์สเปคตรัม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3 ระบบอุปกรณ์การวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา แผนผังแสดงอุปกรณ์ (ก) ภาพแสดงระบบอุปกรณ์การวัด (ข)

ที่มา: สุชิน (2549)

2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์กัมมันตภาพรังสี

ในการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแกมมาจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักที่สำคัญคือ

2.3.1 การวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปลดปล่อยพลังงานนั้นออกมาด้วยการปรับเทียบพลังงาน (energy calibration) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของกัมมันตภาพรังสีแกมมากับ channel number ของสเปกตรัมที่วัดได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยขั้นตอนนี้จะใช้สารกัมมันตรังสีหลายชนิดและแต่ละชนิด ควรมีพลังงานที่แยกจากกันชัดเจน และครอบคลุมพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ต้องตรวจวัดปริมาณโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน

2.3.2 การประเมินหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาหลังทราบชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยอาศัยค่าประสิทธิภาพการวัด

2.4 การหาค่าประสิทธิภาพการวัด

การหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีของตัวอย่าง ต้องทราบค่าประสิทธิภาพการวัดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นๆ ซึ่งค่าประสิทธิภาพการวัดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ตำแหน่งการวางตัวอย่างบนหัววัด ขนาด รูปทรงและเมทริกซ์ของตัวอย่าง และชนิดและการกระจายตัวของสารกัมมันตรีสีในตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า self-absorption โดยประสิทธิภาพการวัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\varepsilon(E)(\%) = 100(N/t)/(a*A*f_c) \quad (1)$$

โดยที่

ε คือ ค่าประสิทธิภาพของการวัดที่พลังงาน (ร้อยละ)

E คือ พลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

N คือ ค่านับวัดสุทธิของพีคที่พลังงานนั้นๆ ต่อวินาที หรือ count per second: cps

t คือ เวลาที่ใช้ในการนับ (วินาที)

a คือ ค่า gamma emission ratio หรืออัตราส่วนของโฟตอนที่ปล่อยออกมาต่อการสลายตัว

A คือ ค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานอยู่ในหน่วยเบ็กเคอเรล

f_c คือ ค่า correction factor สำหรับ self-absorption

2.5 การคำนวณค่ากัมมันตภาพรังสี

เมื่อทราบค่าประสิทธิภาพการวัดของแต่ละชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีในตัวอย่าง เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่าง จึงสามารถนำค่ากัมมันตภาพรังสีที่ตรวจวัดได้มาคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีจากสมการ 2 หรือ 3

$$A = (N/t)/(a*\varepsilon*A*f_c) \quad (2)$$

$$A/W = (N/t)/(a*\varepsilon*A*f_c*W) \quad (3)$$

โดยที่

ε คือ ค่าประสิทธิภาพของการวัดที่พลังงาน (ร้อยละ)

N คือ ค่านับวัดสุทธิของพีคที่พลังงานนั้นๆ ต่อวินาที หรือ count per second (cps)

t คือ เวลาที่ใช้ในการนับ (วินาที)

a คือ ค่า gamma emission ratio หรืออัตราส่วนของโฟตอนที่ปล่อยออกมาต่อการสลายตัว

A คือ ค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานอยู่ในหน่วยเบ็กเคอเรล

f_c คือ ค่า correction factor สำหรับ self-absorption

A/W คือ ค่า Specific Activity หรือค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (เบ็กเคอเรลต่อกรัม)

W คือ ค่าน้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

3. การออกแบบการทดลองระบบนิเวศน์ทางทะเลด้วยเทคนิคตามรอยรังสี

งานเฝ้าตรวจติดตามทางรังสี (radiological monitoring) และงานศึกษาด้านนิเวศน์วิทยารังสีทางทะเลของพื้นที่ก่อตั้งโรงงานนิวเคลียร์หรือสถานปฏิบัติการทางรังสี มักประสบปัญหาในการหาค่า CF และค่าระยะเวลาการขับออกจากร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ ณ บริเวณนั้นๆ เนื่องจากสภาวะแวดล้อมทางทะเลในธรรมชาติ มีปริมาณของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำและในสิ่งมีชีวิตต่ำมาก หรือต่ำกว่าขีดจำกัดล่างของการตรวจวัด นอกจากนี้ การศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของพฤติกรรมการรับและสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสี ไม่สามารถดำเนินการทดลองในภาคสนามได้ เนื่องจากความซับซ้อนของระบบนิเวศน์ในธรรมชาติและยากต่อการควมคุมและดำเนินการทดลอง โดยเฉพาะปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ ความเค็ม และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเล ดังนั้น การศึกษาข้อมูลดังกล่าว จึงต้องดำเนินการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยมีอุปกรณ์หลักที่สำคัญดังนี้ (IAEA, 1997)

3.1 ตู้ทดลองสารกัมมันตรังสี

สิ่งที่สำคัญและยากที่สุดของงานทดลองกับสิ่งมีชีวิตในห้องปฏิบัติการคือ การเลี้ยงสัตว์ทดลองให้มีชีวิตอยู่ได้ด้วยสุขภาพที่แข็งแรงสมบูรณ์เหมือนการอาศัยในธรรมชาติ โดยปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในท้องทะเล ได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็มของน้ำทะเล แสงสว่าง อาหารและสารอาหารและปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพ ดังนั้น จะต้องทดลองเลี้ยงสัตว์ทดลองในห้องปฏิบัติการ (animal acclimation) เป็นลำดับแรกโดยใช้น้ำทะเลที่มีระบบการหมุนเวียนแบบเปิด (open-circulation system)

สำหรับการทดลองกับสารกัมมันตรังสีนั้น จะต้องดำเนินการในระบบปิด (close- circulation system) เพื่อป้องกันการสูญหายของสารกัมมันตรังสี ดังนั้น ในห้องปฏิบัติการจะต้องมีตู้ทดลองอย่างน้อย 2 ตู้ ได้แก่ ตู้ทดลองสำหรับเลี้ยงสัตว์ทดลองในสภาวะจำลองธรรมชาติ และตู้ทดลองขนาดเล็กที่ใช้สำหรับงานทดลองกับสารกัมมันตรังสี และเมื่อเลี้ยงสัตว์ทดลองในห้องปฏิบัติการได้ในระยะหนึ่งแล้ว จึงคัดเลือกสัตว์ทดลองที่มีสุขภาพดีมาใช้ทดลอง ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปประมวลผลในสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติที่เป็นจริงได้

3.2 สารกัมมันตรังสี

การเลือกใช้สารกัมมันตรังสีเป็นสารตามรอย ควรพิจารณาค่าครึ่งชีวิตให้เหมาะสมกับช่วงระยะเวลาที่จะดำเนินการทดลอง ซึ่งอาจใช้สารกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตในระดับวัน สัปดาห์ หรือเดือน และควรเลือกใช้สารกัมมันตรังสีที่ให้กัมมันตภาพรังสีแกมมา เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถวัดค่ากัมมันตภาพได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (non-destructive measurement) สามารถวัดปริมาณการสะสมในร่างกายสัตว์ทดลองและนำมาตรวจวัดซ้ำได้ อีกทั้งสามารถใช้สัตว์ทดลองตัวเดียวกันไปศึกษาได้ตลอดช่วงการทดลอง ซึ่งเป็นการลดจำนวนสัตว์ทดลองที่ต้องใช้ในการศึกษา

3.3 การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสี

การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสี สิ่งสำคัญประการหนึ่งคือหัววัดรังสี โดยควรเลือกหัววัดที่มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดสัตว์ทดลอง โดยปกติ หัววัดที่มีจำหน่ายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 หรือ 15 เซนติเมตร ซึ่งเหมาะกับสัตว์ทดลองขนาดเล็ก เช่น หอย ปู และกุ้ง เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับสัตว์ทดลองขนาดใหญ่ หรือขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในปริมาณมากในการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสี เช่น ปลา สาหร่ายทะเล และหญ้าทะเล เป็นต้น

3.4 การทดลองระบบนิเวศน์ที่มีความซับซ้อน (Mesocosm)

ระบบนิเวศน์ทางธรรมชาติจะมีความความซับซ้อน และเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบย่อยของระบบหลายส่วน (compartment) เช่น น้ำทะเล ดินตะกอน สิ่งมีชีวิตที่เป็นเหยื่อ ผู้ล่าลำดับแรกและลำดับถัดไป การทดลองที่มีระบบย่อยหลายระบบอยู่ร่วมกัน จะมีความซับซ้อนและอธิบายข้อมูลจากผลการทดลองได้ยาก ดังนั้น การออกแบบการทดลองการรับและสะสมสารกัมมันตรังสีและการส่งผ่านห่วงโซ่อาหารไปยังสิ่งมีชีวิตในลำดับถัดไป มักจะดำเนินการศึกษาโดยแยกการทดลองออกเป็นส่วนๆ ในแต่ละลำดับชั้น เช่น น้ำทะเลกับแพลงก์ตอน หรือแพลงก์ตอนกับหอย เป็นต้น

3.5 แนวปฏิบัติทั่วไปสำหรับออกแบบการทดลองนิเวศวิทยารังสีทางทะเล

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการคาดคะเนผลการทดลองในสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติ การออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ จึงต้องคำนึงถึงประเด็นต่างๆ ดังนี้ (IAEA, 1975)

3.5.1 ต้องทราบ physico-chemical form ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยและสารปนเปื้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การทดลอง

3.5.2 ชนิดของระบบที่ศึกษาเป็นระบบเปิดหรือระบบปิดและควรทราบขอบเขตและจำนวนของระบบย่อย หรือ compartment ของระบบที่ศึกษา

3.5.3 เพื่อความสะดวกและไม่ให้เกิดความสับสนควรใช้สัญลักษณ์และเครื่องหมายที่ระบุใน International Commission on Radiation Units (Brownell, 1986)

3.5.4 ก่อนดำเนินการทดลองระบบที่จำลองขึ้นมาต้องอยู่ในสภาวะสมดุลและถ้าไม่เกิดสภาวะสมดุลต้องระบุสาเหตุและต้องดำเนินการตรวจสอบสภาวะการทดลองอย่างต่อเนื่อง

3.5.5 ปัจจัยทางสรีระและพฤติกรรมของสัตว์ทดลองมีผลต่อการทดลอง เช่น พฤติกรรมของสัตว์ทดลองภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ ขนาดและอายุ การเติบโต อัตราการรับอาหาร ภาวะการเจริญพันธุ์ ความสามารถในการควบคุมไอออนของสิ่งมีชีวิต การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของธาตุและการลอกคราบ เป็นต้น ในการศึกษาจึงต้องคำนึงถึงการควบคุมและการตรวจสอบปัจจัยเหล่านี้ด้วย

3.5.6 ควรควบคุมหรือดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณกัมมันตภาพจำเพาะ การดูดซับของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตามรอยหรือธาตุอื่นๆ ตามผนังภาชนะทดลอง และสารปนเปื้อน เป็นต้น

4. กลไกและแบบจำลองการสะสมโลหะหนักของสิ่งมีชีวิตที่ไม่มีกระดูกสันหลัง

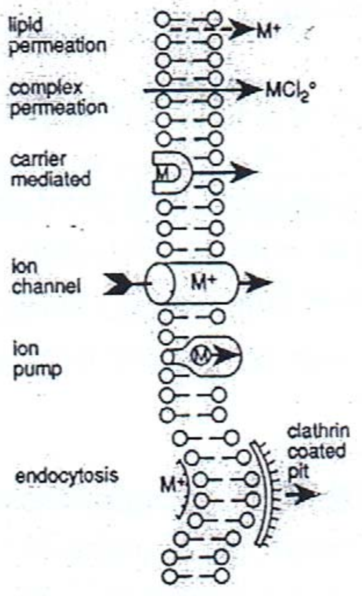
Wang *et al.* (1996) และ Blust (2002) ได้กล่าวถึง กลไกการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักเมื่อสิ่งมีชีวิตได้สัมผัส คือ เมื่อสิ่งมีชีวิตสัมผัสกับโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำทะเล ทางผ่านที่โลหะหนักเข้าสู่เซลล์ร่างกาย ส่วนมากเกิดจากโลหะหนักเคลื่อนย้ายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยกระบวนการ passive diffusion ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีในน้ำกับภายในเนื้อเยื่อ (concentration gradient) นอกจากนี้ ยังมีกลไกอื่นอีกดังแสดงในภาพที่ 4 ได้แก่

4.1 Carrier-facilitated transport เป็นการเคลื่อนย้ายของไอออนของโลหะหนักโดยที่ไอออนของโลหะหนักนี้จะไปจับกับโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane protein) ที่มีสมบัติละลายในไขมัน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวพา หรือ carrier จากนั้น จะเกิดการแพร่ไปทางอีกด้านหนึ่ง หรือเข้าสู่สารละลายภายในเซลล์

4.2 Ion channel transport เป็นการเคลื่อนย้ายเข้าทางผ่านที่ประกอบด้วยสารประกอบโปรตีนที่มีโครงสร้างหลักที่ชอบน้ำ (hydrophilic core) โดยที่ไอออนของโลหะหนักจะถูกเคลื่อนย้ายผ่านโครงสร้างนี้ โดยไม่มีการจับกับ specific sites แต่จะเคลื่อนที่ผ่านด้วยวิธีการสูญเสียโมลเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบไอออนของโลหะ (losing of hydration)

4.3 Passive diffusion ของสารประกอบไร้ขั้ว เป็นการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ เนื่องมาจากโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบในรูปไม่มีขั้วที่สามารถละลายเข้ากับไขมันได้ (lipophilic metal forms) เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เช่น $[HgCl_2]^o$ สารประกอบนี้จะละลายเข้ากับชั้นไขมัน (lipid-bilayer) ของเยื่อหุ้มเซลล์

4.4 Endocytosis เป็นการโค้งตัวของเยื่อหุ้มเซลล์มีลักษณะคล้ายอ่าวเพื่อให้โลหะหนักเคลื่อนย้ายเข้าสู่ภายในเซลล์



ภาพที่ 4 กลไกการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต
ที่มา: Symkiss and Tylor (1989)

เมื่อโลหะหนักเคลื่อนย้ายเข้าสู่ภายในเซลล์แล้ว จะเกิดการจับกับโปรตีนที่มีความสามารถในการจับสูง (high affinity) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอยู่ภายในไซโตรพลาสซึม ความสามารถจับกับโลหะสูงภายในเซลล์ทำให้ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถรับ และสะสมโลหะหนักไว้ในร่างกายได้ ถึงแม้ว่า ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตจะมีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่ก็เป็นความเข้มข้นของไอออนของโซเดียมและโปแตสเซียมเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะไม่แย่งจับกับโปรตีนหรือ complexing agents ในเซลล์

จากแนวคิดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักเข้าสู่เซลล์สิ่งมีชีวิตดังกล่าวข้างต้น ได้มีผู้สนใจเสนอแบบจำลองเพื่อใช้ในการคาดคะเนการเคลื่อนย้ายประกอบด้วย 2 ทางผ่านคือ จากการเคลื่อนย้ายผ่านทางสารละลายและการเคลื่อนย้ายผ่านการกินอาหาร ทั้งนี้ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาได้ให้ความสำคัญกับลักษณะทางสรีระวิทยาของสิ่งมีชีวิต หรือเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะเป็น bioenergentic-based kinetic model (Thomann, 1981; Wang *et al*., 1996; Reinfelder *et al*. 1998) ดังสมการที่ 4

$$dC/dt = (k_u x C_w) + (AExIRxC_f) - (k_e + g)xC \quad (4)$$

โดยที่

C คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เข้าสะสมในร่างกายที่เวลา t (ไมโครกรัมต่อกรัม)

k_u คือ ค่าคงที่อัตราการรับโลหะหนักจากสภาวะน้ำทะเล (ลิตรต่อกรัมต่อวัน)

C_w คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักจากสภาวะน้ำทะเล (ไมโครกรัมต่อลิตร)

AE คือ ประสิทธิภาพการคงอยู่จากการกินอาหารที่มีโลหะหนัก (Assimilation efficiency from ingested food)

IR คือ อัตราการกินของสัตว์ทดลอง (ingestion rate) (มิลิกรัมต่อกรัมต่อวัน)

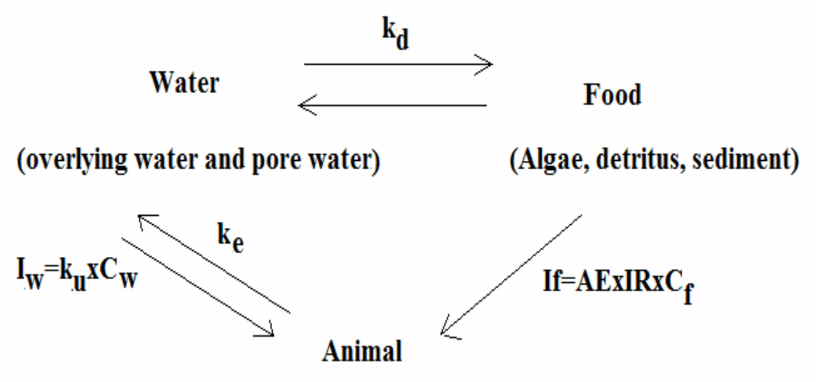
C_f คือ ความเข้มของโลหะหนักในอาหารที่กิน (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม)

k_e คือ ค่าคงที่อัตราจากการขับโลหะหนักออก (ต่อวัน)

g คือ ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโต (ต่อวัน)

t คือ เวลา (วัน)

แบบจำลองดังกล่าวนี้มีสมมติฐานคือ การสะสมโลหะหนักแต่ละทางผ่านเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณโลหะหนักในแต่ละทางผ่าน ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ทางผ่านการได้รับโลหะหนักของสัตว์ทะเลไม่มีกระดูกสันหลังและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสะสมโลหะหนัก

ที่มา: Wang and Fisher (1999)

5. หอยสองฝา

5.1 ลักษณะการดำรงชีพ

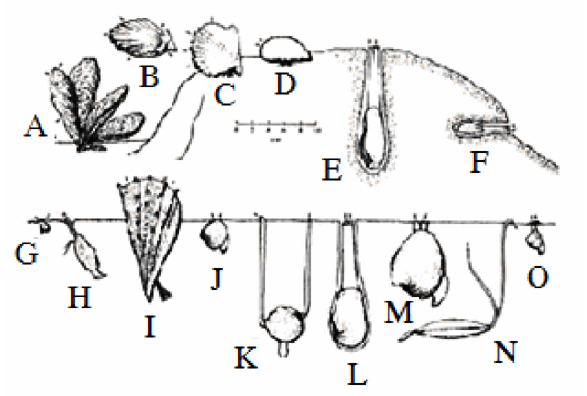
หอยสองฝา มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า Bivalve และมีชื่อเรียกสามัญต่างๆ กัน เช่น หอยกาบ (calm) หอยนางรม(oyster) และหอยแมลงภู่ (mussel) เป็นต้น หอยสองฝาจัดอยู่ใน Class Bivalvia หรือ Pelecypoda มีมากกว่า 15,000 ชนิด อาศัยในน้ำทะเล และมีบางชนิดที่อาศัยในน้ำจืด มีเปลือก ซึ่งประกอบด้วยฝา 2 อัน ประกบกันด้วยเอ็นยึดฝา (hinge ligament) ดำรงชีวิตโดยการกินแพลงก์ตอน หรือซากอินทรีย์ (organic detritus) ด้วยการใช้เหงือกกรองจากน้ำทะเล และมักเรียกสัตว์ประเภทนี้ filter feeder การดำรงชีวิตของหอยสองฝาจำแนกได้ 4 ประเภท ดังภาพที่ 6 (บพิธและนันทพร, 2546; Alan, 2003) กล่าวคือ

ประเภทที่ 1 ได้แก่ หอยจำพวกที่ดำรงชีวิตอยู่บนพื้นท้องน้ำ (A) และยึดเกาะกับวัสดุ (D) โดยอาจใช้เส้นบีสซัส (byssus threads) หรือเปลือกเชื่อมกับพื้น (C) เช่น หอยแมลงภู่ หอยมือเสือ และหอยนางรม

ประเภทที่ 2 ได้แก่ หอยจำพวกที่สามารถเคลื่อนที่อิสระอยู่ตามพื้นท้องน้ำ ไม่ยึดเกาะกับวัสดุ และสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ (B) เช่น หอยเซลล์

ประเภทที่ 3 ได้แก่ หอยจำพวกที่เจาะอยู่ในวัสดุ (E และ F) เช่น หิน ไม้ หรือ ปะการัง เช่น เพรียงเจาะเรือ เป็นต้น

ประเภทที่ 4 ได้แก่ หอยจำพวกที่ชอบฝังตัวอยู่ตามพื้นนุ่ม (G และ O) เช่น พื้นดิน โคลน ทราย ทั้งในระดับตื้นและระดับลึกจากพื้นท้องน้ำ เช่น หอยกาบน้ำจืด



ภาพที่ 6 ลักษณะการดำรงชีวิตของหอยสองฝา
ที่มา: Alan (2003)

5.2 การใช้ประโยชน์หอยสองฝาเพื่อการตรวจติดตามสภาวะแวดล้อม

ได้มีการนำหอยทะเลสองฝามาใช้ในการตรวจติดตามสภาวะแวดล้อมกันอย่างแพร่หลาย (Texas Parks and Wild Life Department, 2004; United State Army for Environmental Research, 2004) เช่น หอยแมลงภู่ (*Mytilus edulis*) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีศักยภาพในการรับและสะสมมลสารไว้ในร่างกายได้มากและสามารถใช้เป็นดัชนีทางชีวภาพบ่งบอกคุณภาพของระบบนิเวศชายฝั่งทะเลได้ (Brown and Luoma, 1995)

ทั้งนี้ Lagadic *et al.* (1998) และ Read (2002) กล่าวถึง คุณสมบัติของสิ่งมีชีวิตที่เหมาะแก่การเป็นดัชนีทางชีวภาพที่ดีเพื่อใช้ประเมินความเสี่ยงทางสิ่งแวดล้อม ดังนี้

5.2.1 สามารถสะสมมลสารได้และไม่ถึงแก่ความตาย

5.2.2 ทราบพื้นที่ที่แพร่กระจายและที่อยู่อาศัย

5.2.3 มีปริมาณเพียงพอและสามารถพบและจับได้ง่าย

5.2.4 มีขนาดพอเหมาะและสามารถควบคุมได้

5.2.5 เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีอายุค่อนข้างยาวเพื่อเหมาะแก่การสุ่มตรวจวัด

5.2.6 เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความสามารถในการสะสมมลสารได้ดี โดยปริมาณการสะสมของมลสารควรมีความสัมพันธ์กับปริมาณมลสารที่ละลายในน้ำ

5.2.7 สิ่งมีชีวิตประเภทเดียวกัน (species) ทุกชนิดที่จะใช้ในการสำรวจควรมีรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมลสารที่มีสะสมในร่างกายและในน้ำแบบเดียวกันในทุกพื้นที่และสภาวะแวดล้อมที่ศึกษา

5.2.8 มีข้อมูลจากการศึกษาในสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันที่มีที่อยู่อาศัยในบริเวณต่างๆ มากเพียงพอ

5.3 ความเหมาะสมในการเป็นดัชนีทางชีวภาพของหอยสองฝา

ลักษณะสำคัญที่ทำให้มีการนำหอยสองฝามาใช้ในการศึกษาหรือใช้เป็นดัชนีทางชีวภาพ (Dame, 1996) ได้แก่

5.3.1 มีปริมาณมากและแพร่กระจายอยู่ทั่วไปตามชายฝั่งทะเลและปากแม่น้ำ

5.3.2 เป็นสัตว์ที่มีที่อยู่อาศัยแน่นอนและมีความสามารถสะสมมลสารได้สูง

5.3.3 มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม

5.3.4 หอยสองฝาที่อาศัยอยู่ในลักษณะแขวนลอยมีความสามารถกรองน้ำทะเลได้ในปริมาณสูง จึงทำให้สะสมมลสารไว้ในร่างกายได้ในระดับความเข้มข้นที่มากกว่าน้ำทะเล

5.3.5 ปริมาณมลสารในเนื้อหอยสามารถใช้ประเมิน biological availability ได้

5.3.6 เป็นสัตว์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ

5.3.7 สามารถเคลื่อนย้ายและนำมาเพาะเลี้ยงได้ง่าย

5.3.8 หอยสองฝาจำนวนมากมีคุณค่าทางอาหารและการสะสมของสารปนเปื้อน มีผลต่อคุณภาพชีวิตประชาชน

5.3.9 มีการตอบสนอง (response) ทั้งทางด้านพฤติกรรมและสรีระวิทยาต่อการกดดัน (stress) ง่าย และสามารถตรวจวัดได้รวดเร็ว

หอยแครง (*A. granosa*) เป็นหอยทะเลสองฝา (marine bivalve) ชนิดหนึ่งจัดอยู่ใน Family Archidae มีลักษณะที่สำคัญคือ มีฟันซี่เล็กๆ เรียงอยู่บนฮินท์เพลท (hinge plate) เป็นแนวตรง เปลือกหนา มีสัน และร่องในแนวตั้ง (radial rib and radial groove) เห็นชัด เอ็นอยู่ด้านนอกเปลือก ไม่มีท่อน้ำ ในเลือดมีสารฮีโมโกลบินเ โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ จะมีสีแดงจึงเรียกว่า “blood clam” เป็นสัตว์ทะเลที่มีนิยมนำมาบริโภค และมีคุณค่าทางเศรษฐกิจอย่างมากในประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2542; Macoy and Chongpeepian, 1988)

6. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการสะสมมลสารของหอยสองฝา

มลสารที่เคลื่อนย้ายเข้าสู่ชายฝั่งทะเล สามารถผ่านเข้าสู่หอยทะเลสองฝาได้ 3 ทางผ่านคือ ผ่านทางน้ำทะเล ผ่านดินตะกอน และผ่านโดยทางอาหาร การเคลื่อนย้ายของมลสารเข้าสะสมในหอยทะเลสองฝายังขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ชนิดของหอยและมลสาร ปัจจัยทางกายวิภาคและสรีระวิทยา สภาวะแวดล้อมที่อยู่อาศัยของหอย และประวัติการสัมผัสกับมลสารชนิดอื่นมาก่อน (Fowler, 1986; Fisher *et al.,* 1996; Hutchin *et al*., 1998; Boisson *et al.*, 1998; Wang *et al*., 1999, 2005) ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

6.1 ความเค็มของน้ำทะเล

Wang and Dei (1999) ได้ทำการศึกษาผลของความเค็มต่ออัตราการรับเข้าของแคดเมียม โครเมียม ซีรีเนียมและสังกะสี ของ หอยแมลงภู่ (*Septifer virgatus*) พบว่า เมื่อค่าความเค็มของน้ำทะเลลดลงอัตราการรับโลหะหนักเหล่านี้เข้าสะสมในตัวหอยสูงขึ้น

6.2 อุณหภูมิ

Hutchins *et al.* (1998) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ (2 และ 12 องศาเซลเซียส) ต่อการรับอะเมริเซียม-241 โคบอลต์-57 และซีเซียม-137 ของหอยทะเลสองฝา clam *Macoma baltica* เข้าสะสมในร่างกายผ่านทางอาหารและน้ำพบว่า อุณหภูมิไม่มีผลต่อการรับโคบอลต์-57 และซีเซียม-137 และไม่พบการสะสมของซีเซียม-137 โดยผ่านทางน้ำ

ขณะที่การศึกษาของ Inza *et al.* (1998) ไม่พบอิทธิพลของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการขับปรอทของหอยทะเลสองฝา Asiatic clam *C. fluminea* โดยหอยชนิดนี้มีการสะสมปรอทได้ดี และมีการขับออกจากร่างกายน้อย ซึ่ง แตกต่างจากหอยแมลงภู่ (*P. perna*) ที่มีการขับปรอท ทองแดง และสังกะสีออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งไม่เหมาะแก่การใช้เป็นดัชนีทางชีวภาพ (Anandraj *et. al*, 2002)

6.3 ชนิดของหอยสองฝา

ชนิดของหอยสองฝา มีผลต่อการสะสมมลพิษเช่นกัน โดย Reinfelder *et al.* (1997) ได้ศึกษาการสะสมและการขับเงิน อะเมริเซียม แคดเมียม โคบอลต์ ซีลีเนียมและสังกะสีออกจากตัวหอย 4 ชนิด คือ หอยนางรม (*C. virginica* Gmelin) หอยทะเลสองฝา *M. balthica* Linnaeus หอยทะเลสองฝา *M. mercenaria* Linnaeus และ หอยแมลงภู่ (*M. edulis* Linnaeus) พบว่า สัตว์ทดลองขับมลสารเหล่านี้ออกจากร่างกายอย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรก จากนั้น อัตราการขับออกจะลดลงและมีรูปแบบของการขับออก (loss kinetic pattern) ไม่แน่นอน โดยหอยทะเลสองฝา *M. balthica* Linnaeus และ *M. mercenaria* Linnaeus สามารถสะสมโคบอลต์และอะเมริเซียมผ่านทางอาหารได้มากกว่าหอยนางรมและแมลงภู่

6.4 แหล่งที่อยู่อาศัย

สภาวะแวดล้อมของที่อยู่อาศัยเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการสะสมมลสาร ซึ่งจากการศึกษาของ Ke and Wang (2001) พบว่า หอยนางรม (*Crassostrea rivularis)* ที่อาศัยบริเวณปากแม่น้ำ และหอยนางรม (*Saccostrea glomerata)* ที่อาศัยอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล มีความสามารถใน

การสะสมแคดเมียม ซีลีเนียมและสังกะสีแตกต่างกัน โดยการสะสมมลสารที่มาจากอาหารมีค่าต่างกันน้อย ทั้งนี้ การสะสมมลสารผ่านทางน้ำจะมากเมื่อค่า CF จากทางผ่านอาหารมีค่าต่ำ

Fisher *et al.* (1999) ได้ศึกษาค่า CF ของซีเซียม-137 สทรอนเชียม-90พลูโตเนียม-239 และพลูโตเนียม-240 ของหอยทะเลสองฝา และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ ได้แก่ สาหร่ายทะเล กุ้ง นกทะเล ปลา แมวน้ำ และค่า Kd ในตัวอย่างดินตะกอนในพื้นที่เขตขั้วโลกและทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ศึกษาไว้ในพื้นที่เขตอบอุ่นพบว่า ค่า CF ของสัตว์ทดลองที่อาศัยในพื้นที่เขตขั้วโลกมีค่าสูงกว่าในพื้นที่แถบเขตอบอุ่น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสัตว์ในเขตขั้วโลกมีเมตาบอลิซึมต่ำกว่าจึงขับ มลสารเหล่านี้ออกช้ากว่าสัตว์ที่อาศัยในเขตอบอุ่น

Ke *et al.* (2000) ได้ศึกษาการสะสมซีเซียม-137 โดยผ่านทางอาหารของหอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) ซึ่งเป็นหอยทะเลสองฝาที่พบได้ในพื้นที่แถบเขตร้อน (tropical region) หรือกึ่งเขตร้อน (subtropical region) ผลการศึกษาพบว่า ค่า CF ของซีเซียม -137 มีค่าสูงกว่าในสภาวะแวดล้อมแบบเขตอบอุ่นมาก (Gungor *et al.*, 2001; Heldal *et al.*, 2001) และความเค็มของน้ำทะเลมีผลต่อกาสะสมซีเซียม-137

6.5 ชนิดของสารประกอบของมลสาร

ชนิดของสารประกอบของมลสารมีความสำคัญต่อการสะสมของหอยสองฝาเช่นกัน จากการศึกษาของ Nicholas *et al.* (1996) พบว่า แมลงภู่ (*Mytilus galloprovincialis)* สะสมโคบอลต์ในรูปสารประกอบอินทรีย์ (cobalamine) ได้มากกว่าในรูปอนินทรีย์ (Co^{2+}) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nolan *et al.* (1992) ที่พบว่า หอยชนิดนี้ สามารถสะสมเงินอะเมริเซียม แคดเมียม โคบอลต์ในรูปสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ ตะกั่ว และสังกะสี ในร่างกายได้ในปริมาณสูง

Inza *et al.* (1998) ได้ศึกษาการสะสมปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์ (methyl mercury, MeHg) และอนินทรีย์ (Hg^{2+}) ของหอยทะเลสองฝา Asiatic clam *C. fluminea* ในเวลา 14 วัน พบว่า หอยชนิดนี้มีอัตราการสะสมปรอทในรูปของสารประกอบอินทรีย์ได้มากกว่า เช่นเดียวกับการศึกษาของ Blackmore and Wang (2004) ที่ศึกษาทางผ่านของปรอททั้งสองชนิดจากแพลงก์ตอนทางผ่านหอยนางรม (*S. cucullata)* ไปยังหอยทาก (whelks *Thais clavigera*) ซึ่งเป็น

สัตว์ประเภทผู้ล่า โดยพบว่า ทางผ่านทั้งสองชนิดมีผลต่อการสะสมปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์มากกว่าปรอทที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. หอยแครง (cockle *Anadara granosa*)
2. แพลงก์ตอนพืช (*Isochrysis galbana*)
3. สารอาหารสูตรกิลลาร์ด f/2 (Guillard f/2)
4. สารกัมมันตรังสีแกมมารวมมาตรฐาน (mixed-γ rays reference standard) ผลิตโดย Amersham plc. ประเทศอังกฤษ
5. สารกัมมันตรังสีปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65 และโคบอลต์-57 ผลิตโดย Isotope Products Laboratories ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. น้ำทะเล
7. ตู้ทดลองรังสี
8. ปั๊มเติมอากาศ (BENZ Aquarium Air Pump)
9. ถังบรรจุกากกัมมันตรังสี
10. กรรไกรและมีดผ่าตัด (ARCO)
11. เครื่องปั่นหมุนเวียน (IEC Centra MP4R)
12. เครื่องวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มาเนียม (high purity germanium detector)
13. แท่งกรองขนาด 1 ไมครอน (CUNO MICRO-WYND II: DCCPY 1)
14. แท่งกรองขนาด 0.22 ไมครอน (Parker FLUFLO ABSO-MATE CARTRIDGE: PAB002-10FA-DO)
15. เครื่องวัดค่าความเค็ม (ATAGO Salinometer)
16. กล้องจุลทรรศน์ (Olympus CH30)
17. สไลด์นับเม็ดเลือด (BOECO Haemacytometer)
18. เครื่องบันทึกการนับจำนวน (Hand Held Tally Counter 24100)
19. เครื่องตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง (Model pH 615, Consort N.V.)
20. สารชำระล้าง (DECO 90)
21. เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 มิลลิกรัม (Metler AT201)

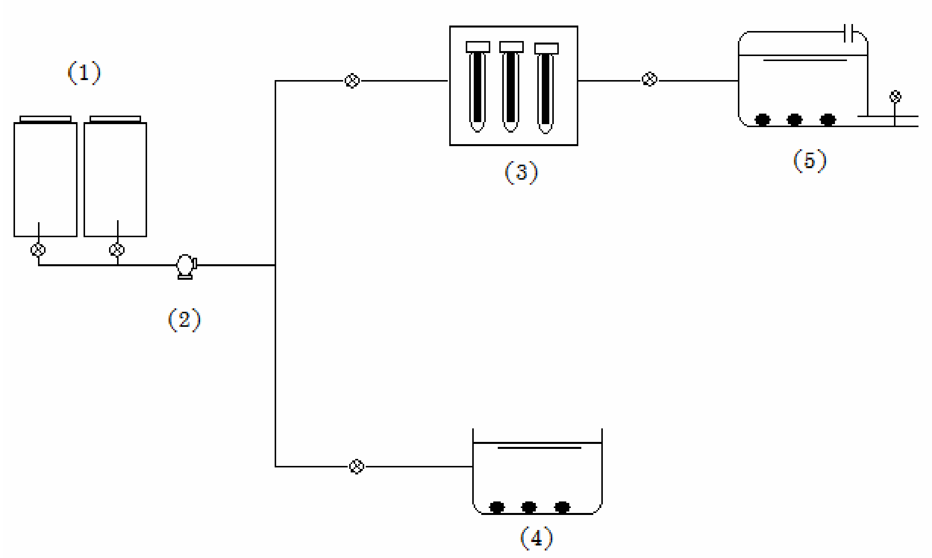
วิธีการ

การทดลองประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมการทดลองและขั้นดำเนินการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ขั้นเตรียมการทดลอง

1.1 การเตรียมน้ำทะเล

การทดลองนี้ใช้น้ำทะเลจากแหล่งที่เพาะเลี้ยงหอยแครง โดยซื้อจากบริษัท อะคอเรียม จำกัด โดยก่อนใช้งานจะถูกกรองผ่านถุงกรองผ้าในเบื้องต้นเพื่อกำจัดตะกอน และสิ่งสกปรกก่อนจะเก็บไว้ในถังกักเก็บขนาดบรรจุ 3,000 ลิตร จำนวน 2 ถัง ซึ่งจะส่งต่อไปยังห้องปฏิบัติการบริเวณส่วนเลี้ยงสัตว์ทดลองและส่วนทดลองทางรังสีต่อไป (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 การเตรียมน้ำทะเลสำหรับการทดลอง การส่งน้ำทะเลเข้าสู่ส่วนต่างๆ ได้แก่ ส่วนกักเก็บ (1) จากนั้นจะใช้ปั๊ม (2) เพื่อส่งน้ำเข้าสู่ส่วนเลี้ยงสัตว์ทดลองในห้องปฏิบัติการ (4) หรือเข้าสู่ระบบกรองน้ำทะเล และเข้าสู่ส่วนทดลองทางรังสี (5)

การเลี้ยงสัตว์ทดลองในห้องปฏิบัติการ จะใช้น้ำทะเลที่ผ่านการกรองขั้นต้นด้วยถุงกรองเท่านั้น ส่วนการทดลองจริงจะใช้น้ำทะเลที่ผ่านระบบกรองแบบคอลัมน์ประกอบด้วยแท่งกรองขนาด 1 ไมครอน จำนวน 2 คอลัมน์และแท่งกรองขนาด 0.22 ไมครอน จำนวน 1 คอลัมน์

การทดลองในเบื้องต้นเพื่อทดสอบระบบกรองน้ำทะเลดังกล่าวด้วยการเลี้ยงสัตว์ทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่า ไม่พบการตายของสัตว์ทดลอง

1.2 การเลี้ยงสัตว์ทดลอง

หอยแครงที่ใช้ในการศึกษาซื้อมาจากแหล่งเพาะเลี้ยง อำเภอคลองด่าน จังหวัดสมุทรปราการ เมื่อสัตว์ทดลองมาถึงห้องปฏิบัติการ จะนำมาทำความสะอาดและเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ และก่อนดำเนินการทดลองจะคัดเลือกสัตว์ทดลองที่มีขนาดความยาวเปลือกและน้ำหนักใกล้เคียงกันมาเลี้ยงในตู้ทดลองโดยใช้น้ำทะเลที่ผ่านการกรอง และให้อาหารด้วยแพลงก์ตอนตลอดระยะทดลองด้วยปริมาณ $1x10^5$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ดังภาพที่ 8) โดยการประเมินความหนาแน่นของเซลล์แพลงก์ตอนใช้สไลด์นับเม็ดเลือด (BOECO haemacytometer) และเครื่องนับ (Hand Held Tally Counter 24100)

ภาพที่ 8 การเลี้ยงหอยแครงในห้องปฏิบัติการก่อนการคัดเลือกเพื่อใช้ในการทดลอง

1.3 การเลี้ยงแพลงก์ตอน

ในธรรมชาติหอยแครงจะกินอาหารโดยการกรองแพลงก์ตอนเข้าสู่ร่างกาย ดังนั้นทุกสายพันธุ์ของแพลงก์ตอนจึงมีโอกาสเป็นอาหารของหอยแครง แพลงก์ตอน *I.galbanna* เป็นแพลงก์ตอนพืชหรือสาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) มีความเหมาะสมในการใช้อนุบาลลูกสัตว์น้ำหรือสัตว์น้ำ เช่น ลูกกุ้ง หอย เป็นต้น (ลัดดา, 2543)

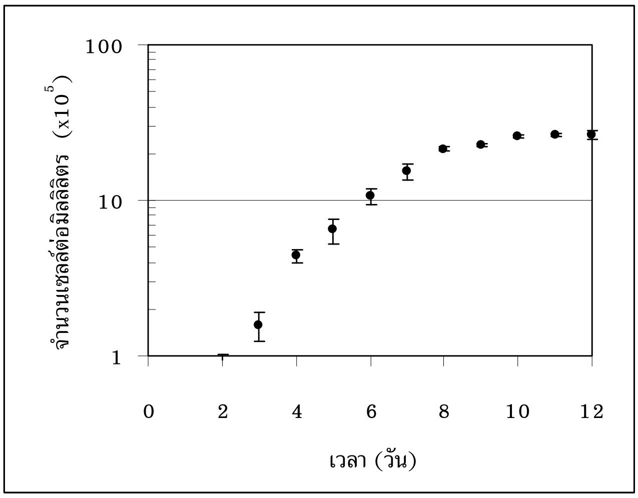
แพลงก์ตอนที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยประมงศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยได้รับหัวเชื้อแพลงก์ตอนที่ผ่านการขยายพันธุ์แล้วนำมาเพาะเชื้อต่อไปอีกโดยใช้ขวดแก้วคาร์บอย (carboy) ขนาด 20 ลิตร และให้อาหารด้วยสารละลายเอฟของกิลลาร์ด (Guillard F medium) โดยใช้ระดับความเข้มข้น F/2 ดังภาพที่ 9 แสดงการเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนและกราฟแสดงการเจริญเติบโต

การทดลองเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนโดยการขยายจำนวนในห้องปฏิบัติเพื่อให้สภาพถึงสภาวะการผลิตแพลงก์ตอนและเพื่อให้ได้ปริมาณของแพลงก์ตอนเพียงพอกับการใช้ในการทดลอง จากกราฟการเจริญเติบโต พบว่า ใช้เวลาประมาณ 6 วัน ก่อนที่ภาวะการเจริญเปลี่ยนจากระยะเอกซ์โพเนียลเชียลไปเป็นระยะเฉื่อย และจากการตรวจวัดประเมินความหนาแน่น พบว่าสามารถผลิตแพลงก์ตอนได้ในระดับ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

1.4 การให้อาหารแก่สัตว์ทดลอง

การให้อาหารแก่สัตว์ทดลอง จะให้หลังจากการเปลี่ยนน้ำทะเลในแต่ละวัน ส่วนการโดยใช้แพลงก์ตอนที่ผ่านการแยกน้ำทะเลออก เพื่อป้องกันการเจือจางของสารกัมมันตรังสีในน้ำทะเล โดยนำแพลงก์ตอนที่ผ่านการขยายพันธุ์แล้วมาทำการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นหมุนเวียน (IEC Centra MP4R) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ ดังภาพที่ 10 ทั้งนี้ สำหรับการทดลองใช้อัตราส่วนการเจือจางของปริมาตรแพลงก์ตอนต่อปริมาตรน้ำทะเลเท่ากับ 20: 35000 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) หรือคิดเป็นร้อยละเท่ากับ 0.0006

(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 การเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอน *I. galbanna* (ก) และจลนพลศาสตร์การเจริญของแพลงก์ตอน (ข)

(ก)

(ข)

ภาพที่ 10 การเตรียมแพลงก์ตอนเพื่อใช้เป็นอาหารแก่สัตว์ทดลอง

(ก) แพลงก์ตอนก่อนถูกปั่นแยก

(ข) แพลงก์ตอนหลังถูกปั่นแยก

การทดลองหาปริมาณอาหารที่เหมาะแก่การทดลองโดยต้องการสภาวะการทดลองประกอบด้วย การป้องกันการหมุนเวียนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสารละลาย ทั้งนี้เพื่อให้หอยแครงรับทุกนิวไคลด์เข้าสะสมในร่างกายและนิวไคลด์กัมมันตรังสีไม่ถูกดูดซับในอาหารและหลงเหลือหมุนเวียนภายในสารละลาย ผลการทดลองในสภาวะทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าการให้แพลงก์ตอนปริมาณ $1X10^5$ เซลล์ต่อมิลิลิตร แก่สัตว์ทดลองในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ไม่พบแพลงก์ตอนในสารละลาย

1.5 ขนาดของสัตว์ทดลอง

สำหรับการทดลองนี้ สัตว์ทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 17.40±1.30 กรัม มีความกว้างและความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 2.97±0.19 และ 4.05±0.18 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 1) และเมื่อทำการศึกษาน้ำหนักเปลือก อวัยวะทั้งตัว และฮีโมลิมฟ์ของสัตว์ทดลอง โดยชำแหละแยกส่วนต่างๆ ด้วยชุดผ่าตัดพบว่า มีน้ำหนักเปลือก อวัยวะทั้งตัว ละฮีโมลิมฟ์เฉลี่ยเท่ากับ 11.04±0.56, 2.74±0.68 และ 2.73±0.38 กรัม ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 2)

1.6 การเตรียมตู้ทดลองรังสี

1.6.1 ตู้ทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ใช้ตู้กระจกขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร และความสูง 60 เซนติเมตร มีฝาปิดพร้อมติดตั้งระบบเติมอากาศในน้ำทะเลด้วยปั๊มเติมอากาศ (BENZ Aquarium Air Pump)

ในการนำน้ำทะเลเข้าตู้ทดลองจะปั๊มน้ำทะเลผ่านการระบบองเข้าสู่ตู้ทดลอง ส่วนในช่วงการถ่ายน้ำทะเลรังสีออกจากตู้ทดลองจะใช้ปั๊มสารเคมีขนาดเล็กปั๊มออกจากตู้ทดลอง

1.6.2 ตู้ทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

เนื่องจากการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะต้องใช้น้ำทะเลในปริมาณมาก ดังนั้น เพื่อป้องกันการเปื้อนรังสีจากการทดลอง จึงดำเนินการออกแบบและสร้างตู้

ทดลองรังสีด้วยกระจกที่มีความหนาขนาด 0.64 เซนติเมตร ความกว้างขนาด 30 เซนติเมตร ความยาว 80 เซนติเมตรและความสูง 30 เซนติเมตร ภายในตู้ทดลองถูกแบ่งกั้นออกเป็น 3 ส่วน (ภาพที่ 11) คือ

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่น้ำทะเลที่ผ่านระบบกรองไหลเข้ามากักไว้และให้น้ำทะเลไหลล้นเข้าสู่ช่องกักน้ำทะเลบริเวณส่วนที่ 2 หรือส่วนกลางตู้ทดลองที่จะถูกใช้วางสัตว์ทดลอง จากนั้น น้ำทะเลจะไหลล้นเข้าสู่ส่วนระบายน้ำทิ้ง หรือส่วนที่ (3) ปริมาตรของน้ำทะเลที่ได้จะพอดีกับปริมาตรที่ออกแบบไว้เพื่อต้องการใช้ทดลอง ทั้งนี้ ทั้ง 3 ส่วนของตู้ จะติดตั้งก๊อกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการระบายสารละลายรังสีหรือระบายน้ำทะเลทิ้งผ่านสายยางลงสู่ภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสี ส่วนบนของตู้มีกระจกปิด เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของไอน้ำ ทะเลรังสี เนื่องจากการเติมอากาศลงในน้ำทะเล จากนั้น ติดตั้งระบบให้แสงสว่าง และเติมอากาศ (BENZ Aquarium Air Pump) ทำการตรวจวัดอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความเค็มของน้ำทะเลตลอดระยะเวลาทดลอง

1.6.3 การทำความสะอาดตู้ทดลองรังสี

ระบายน้ำทะเลที่ใช้แล้วออก เติมน้ำประปาลงในตู้ทดลอง และระบายทิ้ง 2 ครั้ง จากนั้น เติมสารละลาย DECON 90 และน้ำยาทีโพลปริมาณอย่างละ 0.3 เปอร์เซ็นต์ แช่ไว้ประมาณ 5 นาที จากนั้น จึงทำการล้างตู้ด้วยน้ำสะอาด 3-4 ครั้ง และล้างด้วยน้ำทะเลกรอง 1 ครั้ง

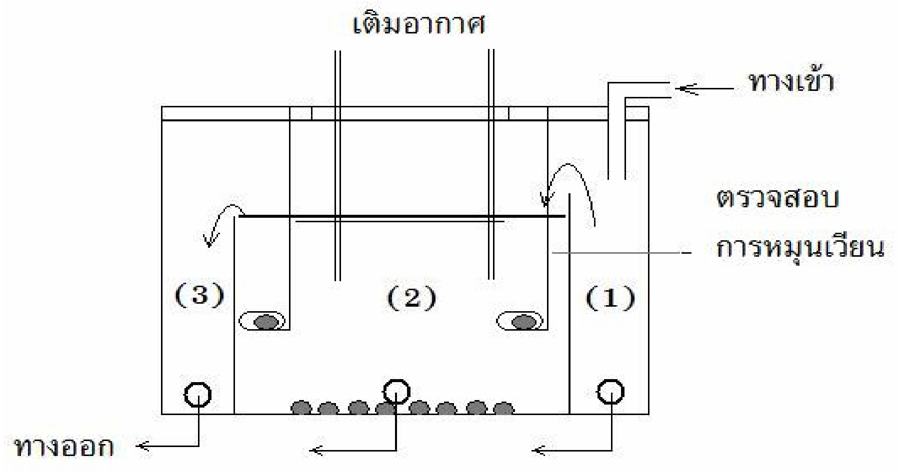
1.7 สารละลายกัมมันตรังสี

1.7.1 ชนิดของสารละลายกัมมันตรังสี

ในการทดลองใช้สารละลายกัมมันตรังสีมาตรฐาน 2 ชนิด คือ สารละลายที่ประกอบด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสีแกมมารวมมาตรฐาน (multi radionuclides standard) ผลิตโดยบริษัท Amersham plc ประเทศอังกฤษ ใช้เตรียมตัวอย่างมาตรฐาน ได้แก่ สัตว์ทดลอง อวัยวะทั้งตัวและน้ำทะเลรังสี และใช้ตัวอย่างมาตรฐานเหล่านี้ ในการปรับเทียบค่าการวัดกัมมันตภาพรังสีของตัวอย่าง สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยจะใช้สารละลายที่ประกอบด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสี

แกมมาเดี่ยว (standard single radionuclide) ผลิตโดยบริษัท Isotope Products Laboratories, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 ตู้ทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี (ก) และแนวการไหลล้นของน้ำทะเล (ข)

1.7.2 ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ระดับความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามรอยที่เติมลงในน้ำทะเลปรากฏดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าครึ่งชีวิต ระดับพลังงาน และความเข้มข้นกัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ใช้ในการทดลอง

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ค่าครึ่งชีวิต	ระดับพลังงาน (keV)	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)
โครเมียม-51	27.7 วัน	320	2.3666
โคบอลต์-57	272 วัน	122.07	0.0521
สังกะสี-65	244 วัน	1115.5	1.7765
สทรอนเชียม-85	64.8 วัน	514	0.910
ซีเซียม-134	2.1 ปี	604	1.370
ปรอท-203	46.6 วัน	279.19	0.2311

1.8 การเตรียมตัวอย่างกัมมันตรังสีมาตรฐาน

1.8.1 น้ำทะเลกัมมันตรังสีมาตรฐาน

บรรจุน้ำทะเลกรองปริมาตร 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในภาชนะทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 เซนติเมตร สูง 5.8 เซนติเมตร จากนั้นเติมสารละลายกัมมันตรังสีมาตรฐานรวมปริมาณ 0.22255 กรัม ลงในตัวอย่างน้ำทะเลปิดฝาภาชนะและปิดแนวประกบของฝา ด้วยแผ่นพาราฟินเพื่อป้องกันสารละลายรังสีไหลออก จากนั้นปิดฉลากรังสีบนภาชนะบรรจุ ดังภาพที่ 12

1.8.2 หอยแครงกัมมันตรังสีมาตรฐาน

ล้างเปลือกหอยแครงให้สะอาด และตากให้แห้ง จากนั้น นำเปลือกหอยด้านหนึ่งทากาวด้านนอกของเปลือกและวางบริเวณกึ่งกลางภาชนะทรงกระบอก ที่มีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 เซนติเมตร สูง 5.8 เซนติเมตร นำกระดาษดูดซับมาพับให้มีขนาดที่สามารถวางลงในเปลือกของหอยแครงได้ นำกระดาษดูดซับนี้ทากาวและติดลงในเปลือกหอยแครงที่วางอยู่กลางภาชนะ จากนั้น เติมสารละลายกัมมันตรังสีมาตรฐานรวมปริมาณ 0.17692 กรัม ลงในกระดาษดูดซับ และประกบเปลือกหอยแครงอีกด้านหนึ่งด้วยกาว ปิดฝาภาชนะทรงกระบอก และปิดฉลากรังสีบนฝากล่องดังภาพที่ 13

ภาพที่ 12 น้ำทะเลกัมมันตรังสีมาตรฐาน

ภาพที่ 13 หอยแครงกัมมันตรังสีมาตรฐาน

1.8.3 อวัยวะทั้งตัวกัมมันตรังสีมาตรฐาน

แช่อวัยวะทั้งตัวของหอยแครงในสารละลายฟอร์มาลินที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 วัน และนำมาไว้ในตู้ดูดควันเป็นระยะเวลา 1วัน เพื่อให้อวัยวะทั้งตัวแห้ง จากนั้น นำมาบรรจุลงในภาชนะทรงกระบอก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 3.5 เซนติเมตร) บริเวณกึ่งกลาง โดยติดด้วยกาวเพื่อป้องกันการเคลื่อนย้าย จากนั้น หยดสารละลายกัมมันตรังสีมาตรฐานรวมปริมาณ 0.18114 กรัม ลงบริเวณส่วนเนื้อโดยทั่ว ปิดฝากล่องและปิดฉลากรังสี ดังภาพที่ 14

ภาพที่ 14 อวัยวะทั้งตัวกัมมันตรังสีมาตรฐาน

ตารางที่ 2 ค่ากัมมันตภาพรังสีรวมของตัวอย่างมาตรฐาน

Radioisotopes	Energy (keV)	Gamma per sec per gram	ค่ากัมมันตภาพรังสีรวม (เบ็กเคอเรล)		
			หอยแครง	อวัยวะทั้งตัว	น้ำทะเล
Cd-109	88.03	645	114	117	144
Co-57	122.1	579	102	105	129
Ce-139	165.9	674	119	122	150
Hg-203	279.2	1977	350	358	440
Sn-113	391.7	2062	365	374	459
Sr-85	514	3907	691	708	870
Cs-137	661.6	2462	436	446	548
Yt-88	898	6232	1103	1129	1387
Co-60	1173	3318	587	601	738
Co-60	1333	3320	587	601	739
Yt-88	1333	6587	1165	1193	1466

หมายเหตุ 1. ค่ากัมมันตภาพรังสีรวมคำนวณวันที่ เตรียมตัวอย่าง 23 กุมภาพันธ์ 2549
2. การทดลองใช้ค่าประสิทธิภาพการวัดของน้ำทะเลมาตรฐานคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างน้ำทะเลและฮีโมลิมฟ์

1.8.4 ค่ากัมมันตภาพรังสีรวมมาตรฐาน

ค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมมาตรฐานที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างมาตรฐานแต่ละชนิด ปรากฏดังในตารางที่ 2

1.9 การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา

การวัดค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีจะอาศัยโปรแกม Gamma Trac 1.22 เพื่อช่วยในการวัดและคำนวณค่าประสิทธิภาพการวัด ขีดจำกัดล่างของการวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิดและคำนวณค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่าง

การตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณรังสีแกมมาของตัวอย่างประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักที่สำคัญคือ

1.9.1 ทำการวัดตัวอย่างมาตรฐานทั้ง 3 ชนิด โดยใช้เวลา 10 นาที จากนั้นดำเนินการปรับเทียบพลังงาน (energy calibration)

1.9.2 หาประสิทธิภาพการตรวจวัด โดยอาศัยน้ำหนักของสารละลายกัมมันตรังสีรวมมาตรฐานที่เติมในตัวอย่างแต่ละชนิด และนำข้อมูลจากใบรับรองของสารละลายกัมมันตรังสีรวมมาตรฐาน (ภาพผนวกที่ 7) มาคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่เติมในตัวอย่างมาตรฐาน และนำค่ากัมมันตภาพรังสีที่วัดได้จากตัวอย่างมาตรฐานนี้มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการวัดจากสมการที่ 1

สำหรับสเปคตรัมจากการวัดตัวอย่างมาตรฐานและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการวัดกับระดับพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิด แสดงดังภาพผนวกที่ 1-6 และค่าขีดจำกัดล่างของการวัดและค่าประสิทธิภาพการตรวจวัดปรอท-203 ซีเซียม-134 สทรอนเชียม-85 สังกะสี-65, โคบอลต์-57และโครเมียม-51 ปรากฏดังในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

จากการทดลองชำแหละหอยแครงเพื่อหาน้ำหนักของแต่ละส่วนของหอยแครงทั้งตัว ได้แก่ เปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ โดยผลการทดลองปรากฏดังในตารางผนวก 2 พบว่า ปริมาณฮีโมลิมฟมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.73 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 0.20 ของปริมาณน้ำทะเลกัมมันตรังสีมาตรฐานและน้ำทะเลตัวอย่าง ซึ่งมีอัตราการเจือจางสูง ดังนั้น การทดลองนี้จะใช้ค่าประสิทธิภาพการวัดของตัวอย่างน้ำทะเลในการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพในตัวอย่างตัวอย่างน้ำทะเลและฮีโมลิมฟ์ ส่วนการวัดค่ากัมมันตภาพของเปลือกจะใช้ค่าประสิทธิภาพการวัดของหอยแครงทั้งตัวเนื่องรูปทรงตัวอย่างใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ขีดจำกัดล่างของการวัด (Lower Limit of Detection: LLD) ของตัวอย่าง

(หน่วย: Bq/g)

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ขีดจำกัดล่างของการวัด		
	หอยแครง	อวัยวะทั้งตัว	น้ำทะเล
โครเมียม-51	28.3	37.70	0.28
โคบอลต์-57	0.56	0.96	0.04
สังกะสี-65	15.5	64.0	0.32
สทรอนเชียม-85	16.2	14.89	1.62
ซีเซียม-134	18.5	22.31	1.85
ปรอท-203	2.08	4.19	0.27

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ประสิทธิภาพการตรวจวัด (ร้อยละ±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)		
	หอยแครง	อวัยวะทั้งตัว	น้ำทะเล
โครเมียม-51	0.421±0.054	0.722±0.097	0.175±0.018
โคบอลต์-57	2.340±0.470	4.240±0.840	0.935±0.146
สังกะสี-65	0.040±0.000	0.066±0.002	0.020±0.006
สทรอนเชียม-85	0.168±0.014	0.272±0.028	0.075±0.005
ซีเซียม-134	0.131±0.000	0.214±0.017	0.058±0.003
ปรอท-203	0.521±0.076	0.899±0.135	0.223±0.025

หมายเหตุ 1. ใช้ค่าประสิทธิภาพการวัดของน้ำทะเลกัมมันตภาพรังสีมาตรฐานคำนวณค่ากัมมันตภาพรจำเพาะของตัวอย่างน้ำทะเลและฮีโมลิมฟ์

2. ใช้ค่าประสิทธิภาพการวัดของหอยแครงกัมมันตภาพรังสีมาตรฐานค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเปลือก

2. ขั้นดำเนินการทดลอง

ดำเนินการจำลองสภาวะแวดล้อมที่อยู่อาศัยของหอยแครง เพื่อทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากน้ำทะเล และการขับสารกัมมันตรังสีออกจากตัวหอย โดยการติดตั้งระบบให้แสงสว่างโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมงและระบบเติมอากาศอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาทดลอง ทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง และค่าความเค็มของน้ำทะเลตลอดระยะเวลาทดลอง

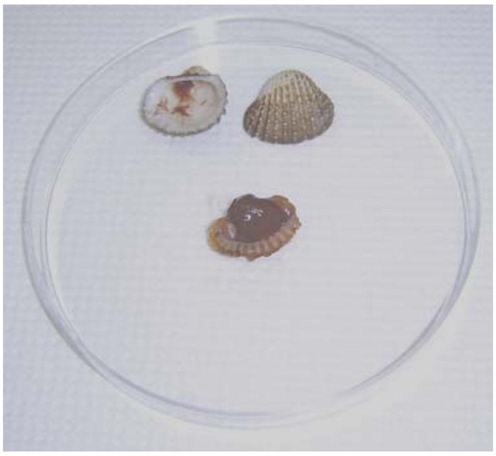
2.1 การศึกษาการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี (uptake experiment)

เติมสารละลายกัมมันตรังสีตามรอยแต่ละชนิดลงในตู้ทดลองและคนให้ทั่ว ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลรังสี กรณีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลรังสีไม่เปลี่ยนแปลง ดำเนินการต่อไปโดย นำสัตว์ทดลองจำนวน 35 ตัว ใส่ในตู้ทดลอง (ภาพที่ 15) ให้อาหาร จากนั้นจึงเปิดระบบเติมอากาศและให้แสงสว่างประมาณ 12 ชั่วโมงต่อวัน ทั้งนี้ จะศึกษาการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยสุ่มตัวอย่างสัตว์ทดลองทุกวันๆ ละ 5 ตัว มาวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในสัตว์ทดลองเป็นเวลาระยะเวลา 26 วัน โดยหลังจากการสุ่มตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีแล้ว จะนำสัตว์ทดลองใส่กลับลงในตู้ทดลองเช่นเดิม โดยจะทำการเปลี่ยนน้ำทะเลรังสีทุกวันที่สองของการทดลองและให้อาหารแก่สัตว์ทดลองหลังจากการสุ่มตัวอย่างเสร็จสิ้นทุกวัน

ภาพที่ 15 การทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครง

2.2 การศึกษาการกระจายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (distribution of radioisotopes)

ดำเนินการศึกษาการกระจายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิด เมื่อการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 26 วันแล้วเสร็จ โดยสุ่มสัตว์ทดลองมา 5 ตัว และทำการชำแหละแยกเป็นส่วนต่างๆ ได้แก่ เปลือก อวัยวะทั้วตัวและฮีโมลิมฟ์ (ภาพที่ 16) จากนั้น นำแต่ละส่วนไปวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสี



ภาพที่ 16 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาการกระจายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมในตัวหอยแครง

2.3 การศึกษาการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี (loss experiment)

เมื่อการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเสร็จสิ้นแล้ว ได้ย้ายสัตว์ทดลองมาเลี้ยงในน้ำทะเลที่ไม่มีสารละลายกัมมันตรังสีในส่วนที่ 2 ของตู้ทดลองดังภาพที่ 17 และเปิดให้น้ำทะเลไหลเข้าตู้ทดลองในส่วนที่ 1 ด้วยอัตรา 10 มิลลิลิตรต่อนาที และปล่อยให้น้ำทะเลไหลล้นเข้าสู่ส่วนที่ 2 และ 3 เพื่อศึกษาการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง โดยทำการสุ่มตัวอย่างสัตว์ทดลองจำนวน 5 ตัว เพื่อตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่เหลือสะสมเป็นเวลา 59 วัน

ตลอดระยะการทดลองจะใช้หอยแครงที่ไม่ได้รับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นสัตว์ทดลองควบคุม เพื่อใช้ตรวจสอบการหมุนเวียนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตำแหน่งต้นน้ำไหลและปลาย น้ำไหล ทั้งนี้ จะทำการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพรังสีในสัตว์ทดลองควบคุมนี้ทุกครั้งเมื่อทำการสุ่มตรวจวัดค่ากัมมันตภาพรังสีในสัตว์ทดลอง

ภาพที่ 17 การทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองการรับและการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากร่างกายของหอยแครงที่ระยะเวลาใดๆ จะทำการคำนวณค่า CF ของข้อมูลการทดลองขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี และคำนวณร้อยละของค่ากัมมันตภาพที่เหลือสะสมในตัวหอยแครง จากการทดลองการขับนิวไคลด?กัมมันตรังสี จากนั้นข้อมูลทั้งสองชุดจะนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบถดถอยเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การสะสม (uptake kinetic parameters) และการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออก (loss kinetic parameters) ประกอบด้วยค่า CF ที่สภาวะสมดุล ค่าอัตราการรับ ค่าคงที่อัตราการรับ ค่าประสิทธิภาพคงเหลือ ค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพและค่าคงที่อัตราการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายของการรับและขับมลสาร

(Wicker and Schultz, 1982; Wanua *et al.,* 1996 ; IAEA, 1997) ทั้งนี้ จะใช้โปรแกมสถิติ statistica version 7.1 (Statsoft, 2004) ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในร่างกาย

การรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากน้ำทะเล และเก็บสะสมไว้ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต สามารถอธิบายด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่า CF ต่อเวลา โดยที่ค่า CF คือ อัตราส่วนของปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในสัตว์ทดลองต่อค่ากัมมันตภาพรังสีที่มีในน้ำ

$$CF = \frac{\text{ปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสัตว์ทดลองต่อน้ำหนัก (เบ็กเคอเรลต่อกรัม)}}{\text{ปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำทะเลต่อน้ำหนัก (เบ็กเคอเรลต่อกรัม)}} \quad (5)$$

การรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของสิ่งมีชีวิตเข้าสู่ร่างกายสามารถอธิบายด้วยสมการ one-component first-order kinetic model

$$CF = CF_{eq}(1 - e^{-k_u t}) \quad (6)$$

โดยที่

CF_t คือ ค่า concentration factor ที่เวลา t

CF_{eq} คือ ค่า concentration factor ที่สภาวะสมดุล

k_u คือ ค่า uptake rate constant (ต่อวัน)

t คือ เวลา (วัน)

ที่สภาวะสมดุล สามารถคำนวณค่าอัตราการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี (uptake rate: *k*) ได้ดังนี้

$$CF_{eq} = k / k_u \qquad (7)$$

โดยที่

CF_{eq} คือ ค่า concentration factor ที่สภาวะสมดุล

k_u คือ ค่า uptake rate constant (ต่อวัน)

k คือ ค่าอัตราการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในร่างกาย (ต่อวัน)

สำหรับกรณีที่สิ่งมีชีวิตรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในร่างกายได้อย่างต่อเนื่องและไม่ปรากฏสภาวะสมดุลจะอธิบายการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีด้วยสมการ

$$CF_t = kt \qquad (8)$$

โดยที่

CF_t คือ ค่า concentration factor ที่เวลา t

k คือ ค่าอัตราการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในร่างกาย (ต่อวัน)

t คือ เวลา (วัน)

3.2 การขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากร่างกาย

การขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากร่างกายของสิ่งมีชีวิตสามารถอธิบายด้วยสมการแบบ linear model ดังนี้

$$A_t = A_o - \lambda t \qquad (9)$$

โดยที่

A_o คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือสะสมที่ระยะเวลาเริ่มต้น

A_t คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือที่เวลา t

λ คือ ค่า biological depuration rate constant (ต่อวัน)

t คือ เวลา (วัน)

หรือสามารถอธิบายด้วยสมการ single-component exponential model

$$A_t = A_o e^{-\lambda t} \tag{10}$$

โดยที่

A_o คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือสะสมที่ระยะเวลาเริ่มต้น

A_t คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือที่เวลา t

λ คือ ค่า biological depuration rate constant (ต่อวัน)

t คือ เวลา (วัน)

หรือ two-component exponential model

$$A_t = A_{os} e^{-\lambda_s t} + A_{ol} e^{-\lambda_l t} \tag{11}$$

โดยที่

A_{os} คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือสะสมที่ระยะเวลาเริ่มต้น ของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกโดยใช้เวลาสั้นๆ

A_{ol} คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือสะสมที่ระยะเวลาเริ่มต้น ของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกโดยใช้เวลานาน

A_t คือ ร้อยละของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือที่เวลา t

λ_s คือ ค่า biological depuration rate constant ของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีในช่วงที่ใช้เวลาสั้น (ต่อวัน)

λ_l คือ ค่า biological depuration rate constant ของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีในช่วงที่ใช้เวลานาน (ต่อวัน)

S คือ สัญลักษณ์กำกับส่วนของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกโดยใช้เวลาสั้นๆ (short component)

l คือ สัญลักษณ์กำกับส่วนของการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกโดยใช้เวลานาน (long component)

t คือ เวลา (วัน)

ระยะเวลาที่สิ่งมีชีวิตสามารถขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากร่างกายครึ่งหนึ่งของปริมาณที่สะสมในร่างกายหรือค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพ (biological half life, $T_{b1/2}$) สามารถคำนวณได้จากค่า biological depuration rate constant โดยที่

$$Tb_{1/2} = \ln 2 / \lambda \qquad (12)$$

โดยที่

$Tb_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพ (วัน)

λ คือ ค่า biological depuration rate constant (ต่อวัน)

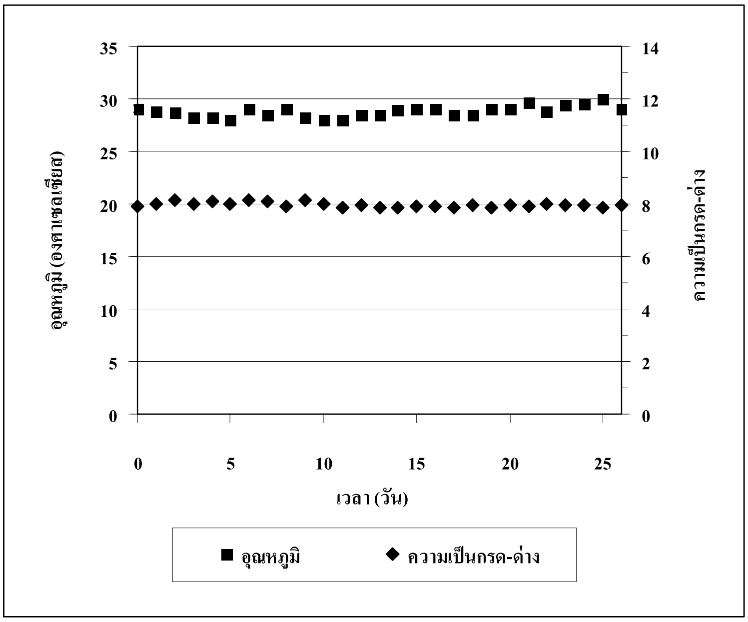
ผลและวิจารณ์

ผล

1. การรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

1.1 ผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความเค็มของน้ำทะล

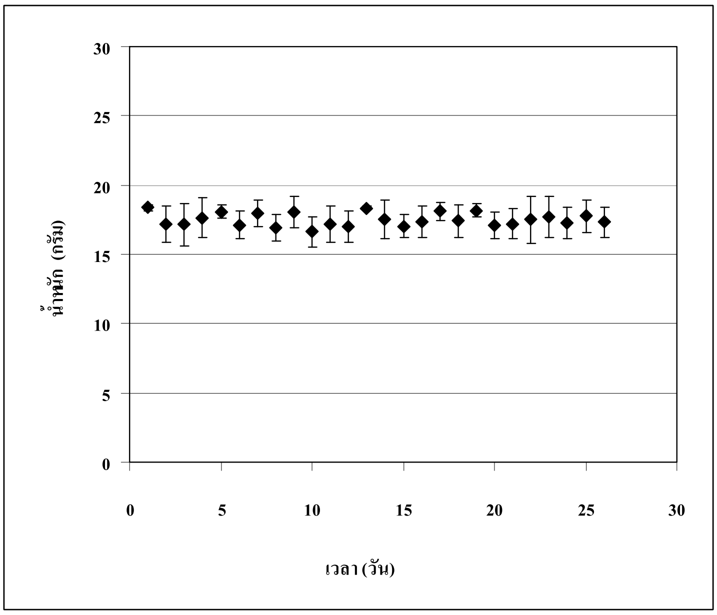
การตรวจวัดคุณภาพของน้ำทะเลตลอดช่วงระยะเวลาของการทดลองการนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน พบว่า น้ำทะเลมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 28.0$\pm$0.5 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.0$\pm$0.1 (ภาพที่ 18) ส่วนค่าความเค็มมีค่าเท่ากับ 30 ส่วนในพันส่วน



ภาพที่ 18 ค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลตลอดระยะเวลาทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง เป็นเวลา 26 วัน

1.2 น้ำหนักของหอยแครง

ไม่ปรากฏการเพิ่มน้ำหนักของสัตว์ทดลองที่สุ่มตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา (ภาพที่ 19) โดยมีค่าน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 17.46±1.08 กรัม และไม่พบการตายของสัตว์ทดลอง



ภาพที่ 19 น้ำหนักของหอยแครงในช่วงการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี เป็นระยะวลา 26 วัน

1.3 ผลการศึกษาการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครง

ผลการศึกษาการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในร่างกาย ปรากฏดังในตารางผนวกที่ 3-4 และข้อมูลจากการประมาณค่าจลนพลศาสตร์การสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.3.1 ซีเซียม-134 และสทรอนเชียม-85

จากการทดลองไม่พบการสะสมซีเซียม-134 และสทรอนเชียม-85 ในตัวหอยแครงตลอดระยะเวลาทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	รูปแบบ	CF_{26t}	CF_{eq} (SE)	k_u(SE) (d^{-1})	R^2	*p-value*	k (d^{-1})
โครเมียม-51	N	22.3±6.4	23.6(3.4)	0.0645(0.01)	0.76	0.0003	1.5(0.2)
โคบอลต์-57	N	554.3±94.8	729.5(59.5)	0.0468(0.02)	0.96	<0.0001	34.1(2.8)
สังกะสี-65	N	93.4±14.1	89.7(1.6)	0.1996(0.01)	0.83	<0.0001	17.9(0.3)
ปรอท-203	L	166.0±77.0	-	-	0.55	<0.0001	6.5(3.3)

หมายเหตุ N = Non-linear model

L = Linear model

$$CF = \frac{\text{ค่ากัมมันตภาพรังสีในตัวหอยแครงต่อน้ำหนัก (เบ็กเคอเรลต่อกรัม)}}{\text{ค่ากัมมันตภาพรังสีในน้ำทะเลต่อน้ำหนัก (เบ็กเคอเรลต่อกรัม)}}$$

CF_{26t} = ค่า concentration factor จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี 26 วัน

SE = Asymptotic standard error

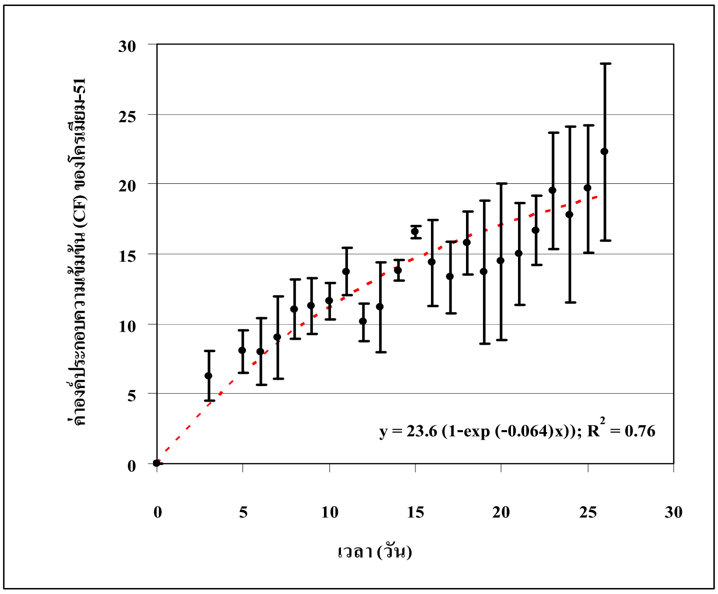
k = ค่าอัตราการรับ (ต่อวัน)

k_{u} = คือค่าคงที่อัตรา (ต่อวัน)

1.3.2 โครเมียม-51

จากการทดลอง พบว่า หอยแครงมีความสามารถในการรับโครเมียม-51 เข้าสะสมในตัวได้ดี (ภาพที่ 20) แต่มีอัตราการสะสมที่ต่ำ ทั้งนี้ จากข้อมูลการศึกษาการสะสมของโครเมียม-51 ในช่วงการทดลอง 5 วันแรก ไม่สามารถตรวจวัดการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนี้ในหอยแครง ซึ่งเป็นไปได้ว่า ปริมาณโครเมียม-51ในหอยแครงมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดล่างของการตรวจวัด (28.3 เบ็กเคอเรลต่อกรัม) และจากการทดลองเป็นระยะเวลา 26 วัน หอยแครงสามารถรับโครเมียม-51 เข้าสะสมในตัวเฉลี่ยเท่ากับ 49.71±10.39 เบ็กเคอเรลต่อกรัม (ตารางผนวกที่ 3) หรือคิดเป็น 22 เท่าของระดับความเข้มข้นของโครเมียม-51 ที่เติมลงในน้ำทะเลในตู้ทดลองรังสี โดยมีค่า CF เฉลี่ยเท่ากับ 22.3±6.4 (ตารางผนวกที่ 4)

จลนพลศาสตร์ของการสะสมโครเมียม-51 ระยะเวลาทดลอง 26 วัน มีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะสมดุล และมีรูปแบบเป็น one-component first-order kinetic model และจากการประมาณค่าที่สภาวะสมดุล พบว่า การรับโครเมียม-51 จะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 44.9 วัน โดยมีค่า CF เท่ากับ 23.6 มีค่าอัตราการรับเท่ากับ 1.5 ต่อวัน และมีค่าคงที่อัตราการรับเท่ากับ 0.0645 ต่อวัน (ตารางที่ 4)

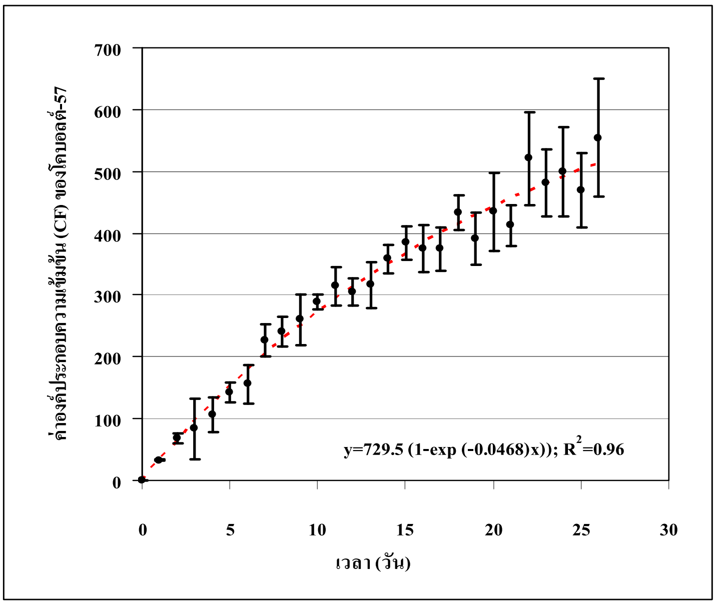


ภาพที่ 20 จลนพลศาสตร์ของการสะสมโครเมียม-51 ในหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ

1.3.3 โคบอลต์-57

จากการทดลองพบว่า หอยแครงมีความสามารถในการรับโคบอลต์-57 เข้าสะสมในตัวได้ดี (ภาพที่ 21) โดยจากการทดลอง 26 วันหอยแครงสามารถสะสมโคบอลต์-57 เข้าสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 31.43±3.67 เบ็กเคอเรลต่อกรัม (ตารางผนวกที่ 3) หรือคิดเป็น 554 เท่าของระดับความเข้มข้นของโครเมียม-51 ที่เติมลงในน้ำทะเลในตู้ทดลองรังสี หรือมีค่า CF เฉลี่ยเท่ากับ 554.3±94.8 (ตารางผนวกที่ 4)

จลนพลศาสตร์ของการสะสมโคบอลต์-57 ที่ระยะเวลาทดลอง 26 วัน มีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะสมดุลและมีรูปแบบเป็น one-component first-order kinetic model และจากการประมาณค่าที่สภาวะสมดุล พบว่า การรับโคบอลต์-57 ของหอยแครงจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 30.4 วัน โดยมีค่า CF เท่ากับ 729.5 ค่าอัตราการรับเท่ากับ 34.1 ต่อวัน และมีค่าคงที่อัตราการรับเท่ากับ 0.0468 ต่อวัน (ตารางที่ 4)

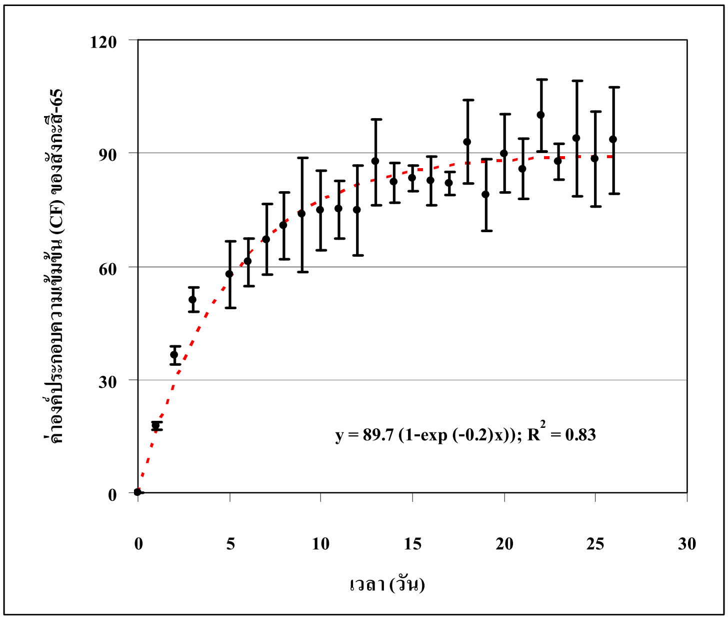


ภาพที่ 21 จลนพลศาสตร์การสะสมโคบอลต์-57 ในหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ

1.3.4 สังกะสี-65

จากการทดลองพบว่า หอยแครงมีความสามารถในการรับสังกะสี-65 เข้าสะสมในร่างกายได้ดี (ภาพที่ 22) โดยจากการทดลอง 26 วัน สามารถรับสังกะสี-65 เข้าสะสมในตัวเฉลี่ยเท่ากับ 185±12.37 เบ็กเคอเรลต่อกรัม (ตารางผนวกที่ 3) หรือคิดเป็น 93 เท่า ของระดับความเข้มข้นของสังกะสี-65 ที่เติมลงในน้ำทะเลในตู้ทดลองรังสี หรือมีค่า CF เฉลี่ยเท่ากับ 93.4±14.1 (ตารางผนวกที่ 4)

จลนพลศาสตร์การสะสมสังกะสี-65 เข้าสะสมในตัวหอยแครง เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 16 วัน และมีรูปแบบเป็น one-component first-order kinetic model โดยมีค่า CF ที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 89.7 ค่าอัตราการรับเท่ากับ 17.9 ต่อวัน และมีค่าคงที่อัตราการรับเท่ากับ 0.2 ต่อวัน (ตารางที่ 4)

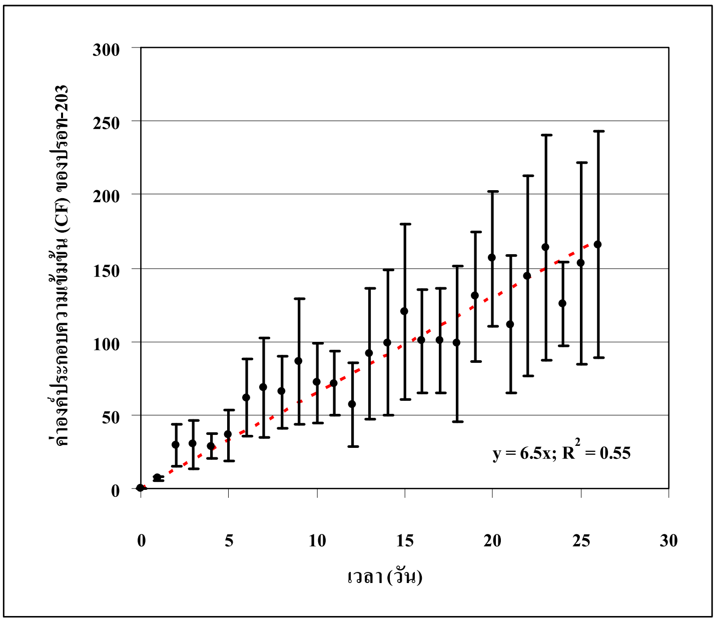


ภาพที่ 22 จลนพลศาสตร์การสะสมสังกะสี-65 ในหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ

1.3.5 ปรอท-203

จากการทดลองพบว่า หอยแครงมีความสามารถในการรับปรอท-203 เข้าสะสมในตัวได้ดี (ภาพที่ 23) โดยจากการทดลอง 26 วันสามารถรับปรอท-203 เข้าสะสมในตัวเฉลี่ยเท่ากับ 38.04±16.63 เบ็กเคอเรลต่อกรัม (ตารางผนวกที่ 3) หรือคิดเป็น 166 เท่า ของระดับความเข้มข้นของปรอท-203 ที่เติมลงในน้ำทะเลในตู้ทดลองรังสี หรือมีค่า CF เฉลี่ยเท่ากับ 166.0±77.0 (ตารางผนวกที่ 4)

จลนพลศาสตร์การสะสมปรอท-203 เข้าสะสมในตัวหอยแครงที่ระยะเวลาทดลอง 26 วัน ไม่ปรากฏแนวโน้มเข้าสู่สภาวะสมดุลและมีรูปลักษณะแบบเชิงเส้น โดยมีค่าอัตราการรับเท่ากับ 6.5 ต่อวัน (ตารางที่ 4)



ภาพที่ 23 จลนพลศาสตร์การสะสมปรอท-203 ในหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ

1.3.5 การเปรียบเทียบการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ผลการเปรียบเทียบการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 24

ก. หอยแครงไม่สะสมซีเซียม-134 และสทรอนเชียม-85 แต่สามารถสะสมโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ในร่างกายได้ดี

ข. ด้วยระยะเวลาทดลอง 26 วัน มีเพียงการสะสมของสังกะสี-65 ที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ในขณะที่การสะสมโครเมียม-51 และโคบอลต์-57 มีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยจลนพลศาสตร์ของการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้ง 3 ชนิด มีรูปแบบเป็น one-component first-order kinetic model สำหรับจลนพลศาสตร์ของการสะสมปรอท-203 มีลักษณะแบบเชิงเส้น

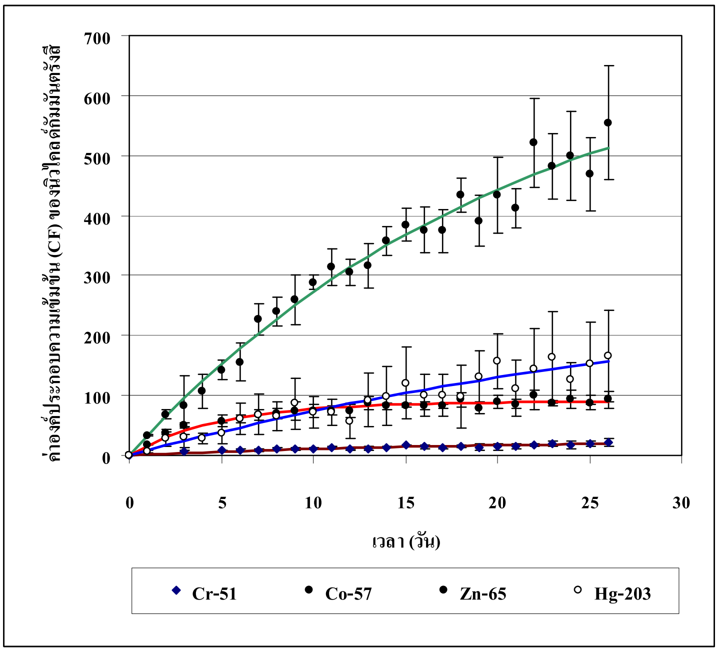
ค. อัตราการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้คือ โคบอลต์-57 (34.1 ต่อวัน) สังกะสี-65 (17.9 ต่อวัน) ปรอท-203 (6.5 ต่อวัน) และโครเมียม-51 (1.5 ต่อวัน)

ง. ค่า CF ของการทดลองเป็นระยะเวลา 26 วัน เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้คือ โคบอลต์-57 (554.3$\pm$94.8) ปรอท-203 (166.0$\pm$77.0) สังกะสี-65 (93.4$\pm$14.1) และโครเมียม-51 (22.3$\pm$6.4)

จ. การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของโครเมียม-51 ในปริมาณสูง เนื่องจากประสิทธิภาพการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า และผลการทดลองพบว่าหอยแครงมีอัตราการรับโครเมียม-51 เข้าสะสมในตัวหอยแครงมีค่าต่ำสุด ค่า CF ของโครเมียม-51 จึงมีค่าต่ำ ดังนั้น การรับโครงเมียม-51 เข้าสะสมในตัวหอยจึงต้องใช้ระยะเวลานานกว่าที่จะมีจลนพลศาสตร์การรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดนี้เข้าสู่ภาวะสมดุล ขณะที่หอยแครงมีค่าอัตราการรับโคบอลต์-57 สูงสุด ค่า CF จึงมีค่าสูงสุดจลนพลศาสตร์การสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดนี้เข้าสู่ภาวะสมดุลได้รวดเร็วว่าโครเมียม-51

ฉ. ค่าอัตราการสะสมของสังกะสี-65 จะต่ำกว่าของโคบอลต์-57ประมาณ 2 เท่า แต่การสะสมของนิวไคลด์นี้เข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วกว่า ทั้งนี้ เหตุผลหนึ่งคือ ความเข้มข้นของสังกะสี-65 ในน้ำทะเลมีปริมาณสูงกว่าประมาณ 36 เท่า

ช. ค่าอัตราการสะสมของปรอท-203 มีค่าต่ำกว่าของสังกะสี-65 (ประมาณ 2.8 เท่า) และโคบอลต์-57 (ประมาณ 5.2 เท่า) แต่มีค่า CF ที่ระยะเวลา 26 วันสูงกว่าสังกะสี-65 ทั้งที่น้ำทะเลมีความเข้มข้นของปรอท-203 ต่ำกว่า แสดงว่า หอยแครงมีความสามารถสะสมปรอท-203ได้ดีกว่าสังกะสี-65 อีกทั้งรูปแบบจลนพลศาสตร์การสะสมสังกะสี-65 เป็นแบบ one-component first-order kinetic model ขณะที่รูปแบบจลนพลศาสตร์การสะสมปรอท-203 เป็นแบบ linear model หรือแบบเชิงเส้น และถึงแม้ว่าหอยแครงจะมีอัตราการสะสมปรอท-203 ต่ำกว่าโคบอลต์-57 แต่ยังมีแนวโน้มในการสะสมเพิ่มได้อีก



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การสะสมของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ในหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 26 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ

2. การสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์

ผลการศึกษาการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในส่วนต่างๆ ของตัวหอยแครง ได้แก่ เปลือก อวัยวะทั้งตัว และฮีโมลิมฟ์ ด้วยการชำแหละแยกส่วนปรากฏดังในตารางที่ 5-7 และภาพที่ 25 พบว่า

2.1 มีการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เปลือกและอวัยวะทั้งตัวเป็นส่วนใหญ่ โดยมีเพียงปริมาณเล็กน้อยที่สะสมในส่วนฮีโมลิมฟ์

2.2 ปริมาณการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในส่วนต่างๆ ของหอยแครง เรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้

2.2.1 เปลือก: โคบอลต์-57 สังกะสี-65 โคเมียม-51 ปรอท-203

2.2.2 อวัยวะทั้งตัว: ปรอท-203 โครเมียม-51 สังกะสี-65 โคบอลต์

2.2.3 ฮีโมลิมฟ์: โคบอลต์-57 ปรอท-203 สังกะสี-65

2.3 ค่า CF ของทุกนิวไคลด์กัมมันตรังสีในส่วนอวัยวะทั้งตัว มีค่าสูงกว่าในส่วนเปลือกและฮีโมลิมฟ์ ตามลำดับ ยกเว้นค่า CF ของโคบอลต์-57 ของเปลือกที่มีค่าสูงกว่าในส่วนอวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 6 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ที่สะสมในส่วนเปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน

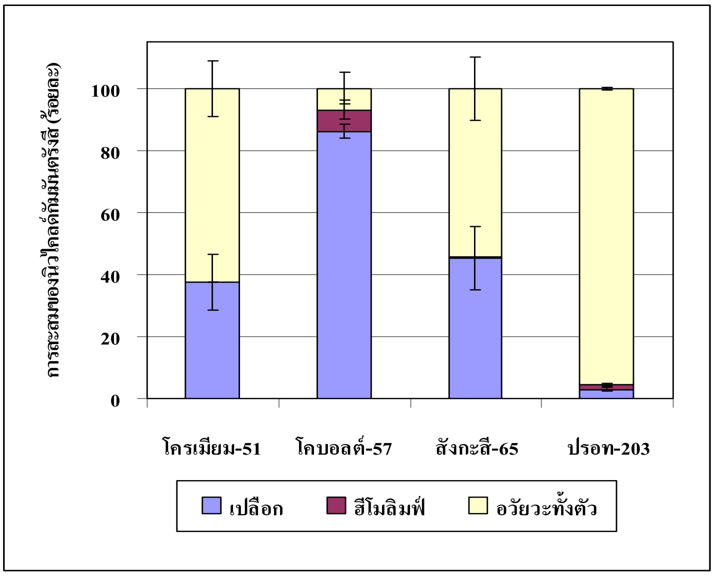
นิวไคลด์	น้ำทะเล	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Bq/g)		
กัมมันตรังสี	(Bq/ml)	เปลือก	อวัยวะทั้งตัว	ฮีโมลิมฟ์
โครเมียม-51	2.3666	73.16±15.08	123.48±22.23	nd
โคบอลต์-57	0.0521	53.78±3.49	4.39±1.83	4.45±2.20
สังกะสี-65	1.7756	275±64.50	328.60±60.19	2.26±0.34
ปรอท-203	0.2311	9.61±2.09	307.22±45.40	4.79±1.27

หมายเหตุ nd = ไม่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อขีดจำกัดล่างของการวัดโครเมียม-51ของฮีโมลิมฟ์มีค่าเท่ากับ 0.28 เบ็กเคอเรลต่อกรัม

ตารางที่ 7 ร้อยละการสะสมของปริมาณโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65และปรอท-203 ที่สะสม ที่เปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน

นิวไคลด์	น้ำทะเล	ร้อยละ		
กัมมันตรังสี	(Bq/ml)	เปลือก	อวัยวะทั้งตัว	ฮีโมลิมฟ์
โครเมียม-51	2.3666	37.2±7.8	62.8±11.3	-
โคบอลต์-57	0.0521	85.9±5.6	7.0±2.9	7.1±3.5
สังกะสี-65	1.7756	45.4±10.7	54.2±9.9	0.4±0.06
ปรอท-203	0.2311	3.0±0.7	95.5±14.1	1.5±0.4

หมายเหตุ (-) ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่สามารถตรวจวัดโครเมียม-51 ได้ เมื่อขีดจำกัดล่างของการวัดโครเมียม-51ของฮีโมลิมฟ์มีค่าเท่ากับ 0.28 เบ็กเคอเรลต่อกรัม



ภาพที่ 25 การสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (ร้อยละ) ที่เปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ ของหอยแครงที่ระยะเวลาการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 26 วัน

ตารางที่ 8 ค่า CF ของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ของเปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	น้ำทะเล (Bq/ml)	CF		
		เปลือก	อวัยวะทั้งตัว	ฮีโมลิมฟ์
โครเมียม-51	2.3666	30.9±6.4	52.2±9.4	-
โคบอลต์-57	0.0521	1032.2±77.0	84.3±35.1	85.4±42.2
สังกะสี-65	1.7756	154.9±36.3	185.1±33.9	1.3±0.2
ปรอท-203	0.2311	41.6±9.0	1329.4±196.4	20.7±5.5

หมายเหตุ CF หรือ Concentration Factor คือ อัตราส่วนของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเปลือกหรืออวัยวะทั้งตัวหรือฮีโมลิมฟ์ต่อน้ำหนักสด (เบ็กเคอเรลต่อกรัม) ต่อค่ากัมมันตภาพจำเพาะในน้ำทะเล (เบ็กเคอเรลต่อกรัม)

(-)ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่สามารถตรวจวัดโครเมียม-51 ได้ เมื่อขีดจำกัดล่างของการวัดโครเมียม-51ของฮีโมลิมฟ์มีค่าเท่ากับ 0.28 เบ็กเคอเรลต่อกรัม

3. การขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ตลอดช่วงระยะเวลาทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวของหอยแครง พบว่าสามารถตรวจวัดโครเมียม-51 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงได้เพียง 24 วัน ทั้งนี้ เนื่องจากหอยแครงสะสมโครเมียม-51 ได้ในปริมาณน้อย โดยมีอัตราการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดนี้ต่ำ อีกทั้งโครเมียม-51 มีค่าครึ่งชีวิตสั้นเพียง 27 วัน จึงสลายตัวได้อย่างรวดเร็วและมีโครเมียม-51 เหลือสะสมในตัวในปริมาณต่ำกว่าค่าขีดจำกัดล่างของการตรวจวัด (28.3 เบ็กเคอเรลต่อกรัม) ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลของโครเมียม-51 จากการทดลองจำนวน 24 วัน

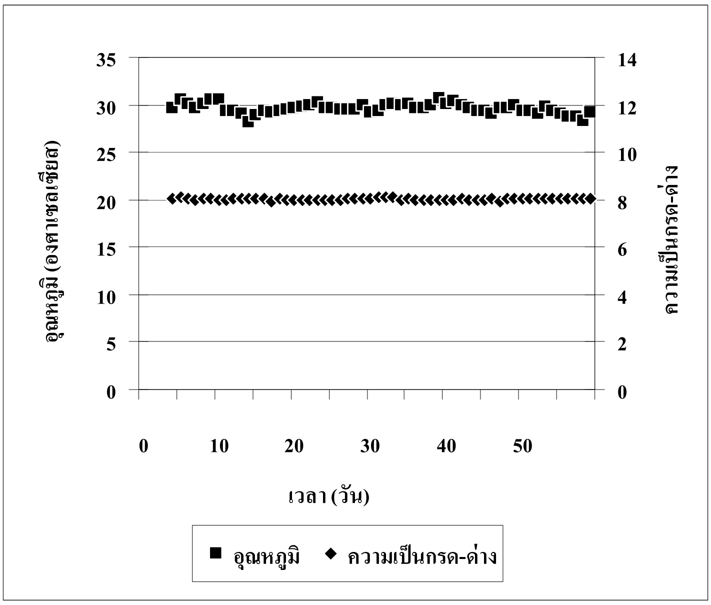
สำหรับการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีโคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ได้ศึกษาเป็นระยะเวลา 59 วัน และจากการทดลองพบว่า สัตว์ทดลองตัวอย่างที่ 3 ตายในวันที่ 44 และสัตว์ทดลองตัวอย่างที่ 4 ตายในวันที่ 39 จึงวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงเพียง 4 ตัว เริ่มจากการทดลองวันที่ 39 ถึงวันที่ 43 และหลังจากการทดลองวันที่ 43 ถึงวันที่ 59 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสัตว์ทดลองเพียง 3 ตัว คือสัตว์ทดลองตัวที่ 1 ตัวที่ 2 และตัวที่ 5

3.1 ผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความเค็มของน้ำทะเล

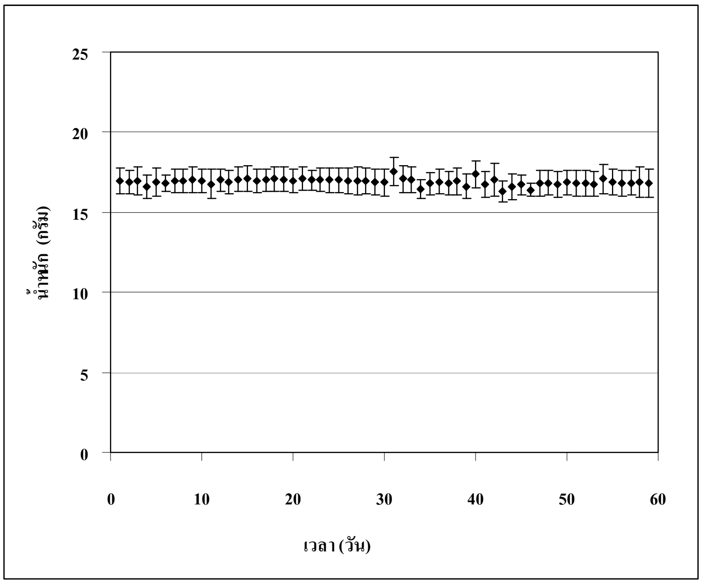
ค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเล แสดงในภาพที่ 26 พบว่าตลอดระยะเวลาของการทดลองการขับสารกัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง น้ำทะเลมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 29.6±0.6 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.0±0.0 และมีค่าความเค็มเท่ากับ 30 ส่วนในพันส่วน

3.2 น้ำหนักของหอยแครง

น้ำหนักเฉลี่ยของหอยแครงมีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาทดลอง (ภาพที่ 27) โดยก่อนทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 16.95±0.79 กรัม และหลังจากเสร็จสิ้นการทดลองมีน้ำหนัก เฉลี่ยเท่ากับ 16.90±0.21 กรัม



ภาพที่ 26 ค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลของการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครงเป็นระยะเวลา 59 วัน



ภาพที่ 27 น้ำหนักของหอยแครงตลอดระยะเวลาทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 59 วัน

ตารางที่ 9 ค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	แบบ	$A_{os}(SE)$ (%)	$\lambda_s(SE)$ (d^{-1})	$Tb_{1/2s}$ (d)	*p-value*	$A_{ol}(SE)$ (%)	$\lambda_l(SE)$ (d^{-1})	$Tb_{1/2l}$ (d)	R^2	*p-value*
โครเมียม-51	O	100	0.045(0.002)	15.5	<0.0001	-	-	-	0.86	-
โคบอลต์-57	T	25.7(2.3)	0.137(0.02)	5.8	<0.0001	76.1(2.2)	0.007(0.001)	124.6	0.88	<0.0001
สังกะสี-65	T	85.1(3.2)	0.111(0.01)	8.0	<0.0001	16.6(3.7)	0.001(0.004)	118.6	0.94	0.04
ปรอท-203	T	12.5(3.3)	0.013(0.0)	5.1	<0.0001	87.7(1.6)	0.60(0.34)	99.2	0.81	0.08

หมายเหตุ T = two-component loss model

O = one-component loss model

A_{os} = short component

A_{ol} = long component

SE = asymptotic standard error

p-level = determination of adjustment

λ = biological depuration rate constant

$Tb_{1/2}$ = biological half life

R^2 = coefficient of determination

3.3 ผลการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพรังสีในสัตว์ทดลองควบคุม

ตลอดระยะเวลาทดลอง ไม่พบค่ากัมมันตภาพรังสีในสัตว์ทดลองควบคุม ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ระบบการเติมน้ำทะเลของการทดลองนี้ไม่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในน้ำทะเล

3.4 ผลการศึกษาการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัวหอยแครง

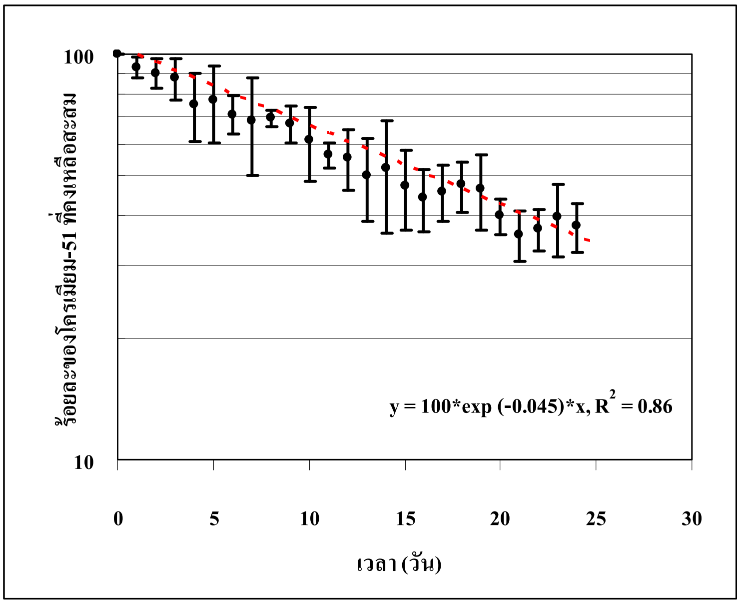
ผลการศึกษาการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกตัวหอยแครงได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ 5-6 และข้อมูลจากการประมาณค่าจลนพลศาสตร์การขับ นิวไคลด์กัมมันตรังสีได้แสดงไว้ในตารางที่ 9 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.4.1 โครเมียม-51

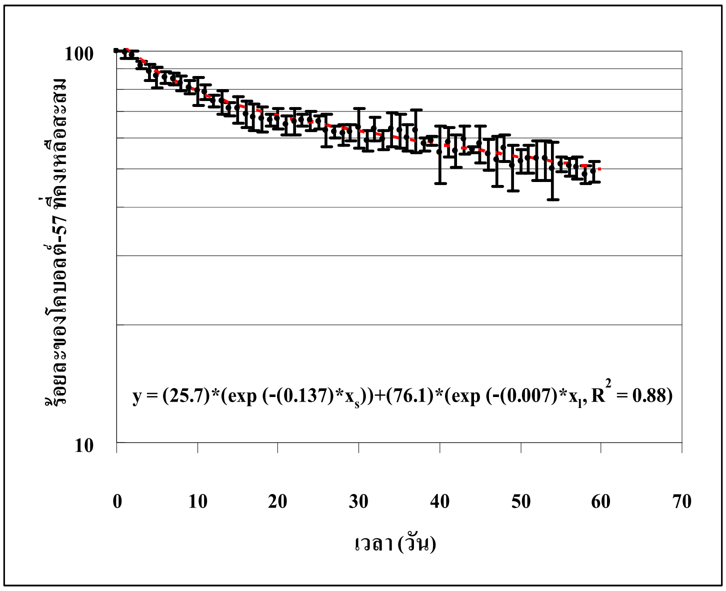
เมื่อสิ้นสุดการทดลองการขับนิวไคลด์ออกจากตัวหอยแครงเป็นระยะเวลา 24 วัน พบว่า หอยแครงขับโครเมียม-51 ออกจากตัวได้ร้อยละ 62.7 (ตารางผนวกที่ 6) โดยลักษณะของจลนพลศาสตร์การขับโครเมียม-51 ของหอยแครงมีรูปแบบเป็น linear model โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพเท่ากับ 16 วัน (ภาพที่ 28 และตารางที่ 9)

3.4.2 โคบอลต์-57

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 59 วัน หอยแครงสามารถขับโคบอลต์-57 ออกจากตัวได้ร้อยละ 50.7 (ตารางผนวกที่ 6) ลักษณะจลนพลศาสตร์การขับโคบอลต์-57 ออกจากตัวหอยแครงมีรูปแบบเป็น two-component exponential model โดยช่วงเริ่มต้นหอยแครงจะขับโคบอลต์ -57 ออกอย่างรวดเร็วคิดเป็นร้อยละ 26 โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพสำหรับการขับโคบอลต์ -57 ออกอย่างรวดเร็วเท่ากับ 6 วัน จากนั้น โคบอลต์-57 ที่เหลือทั้งหมดจะถูกขับออกอย่างช้าๆ โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพสำหรับการขับโคบอลต์ -57 ออกอย่างช้านี้เท่ากับ 125 วัน (ภาพที่ 29 และตารางที่ 9)



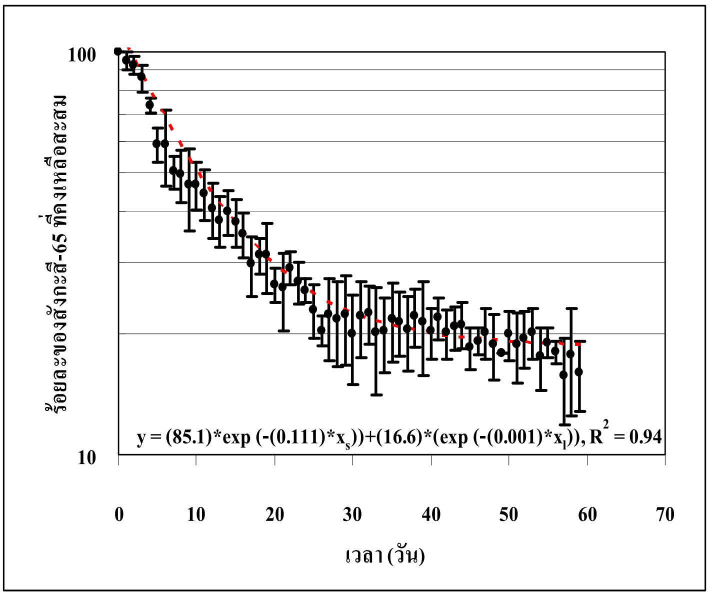
ภาพที่ 28 ร้อยละของโครเมียม-51 ที่คงเหลือสะสมในตัวหอยแครงเมื่อเลี้ยงเป็นระยะเวลา 59 วัน สามารถตรวจวัดโครเมียม-51 ได้เพียง 24 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ



ภาพที่ 29 ร้อยละของโคบอลต์-57 ที่คงเหลือสะสมในการเลี้ยงหอยแครงเป็นระยะเวลา 59 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน), ของการทดลอง 5 ซ้ำ สำหรับวันที่ 1-39 การทดลอง 4 ซ้ำ สำหรับวันที่ 40-44 และการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับวันที่ 45-49

3.4.3 สังกะสี-65

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 59 วัน หอยแครงสามารถขับสังกะสี-65 ออกจากตัวหอยแครงได้ร้อยละ 83.6 (ตารางผนวกที่ 6) ลักษณะจลนพลศาสตร์การขับสังกะสี-65 มีรูปแบบ two-component exponential โดยช่วงเริ่มต้นหอยแครงจะขับสังกะสี-65 ออกอย่างรวดเร็วคิดเป็นร้อยละ 85 โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพสำหรับการขับสังกะสี-65 ออกอย่างรวดเร็วเท่ากับ 5 วัน จากนั้น สังกะสี-65 ที่เหลือทั้งหมดจะถูกขับออกอย่างช้าๆ โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับสังกะสี-65 ออกอย่างช้านี้เท่ากับ 118.6 วัน (ภาพที่ 30 และตารางที่ 9)

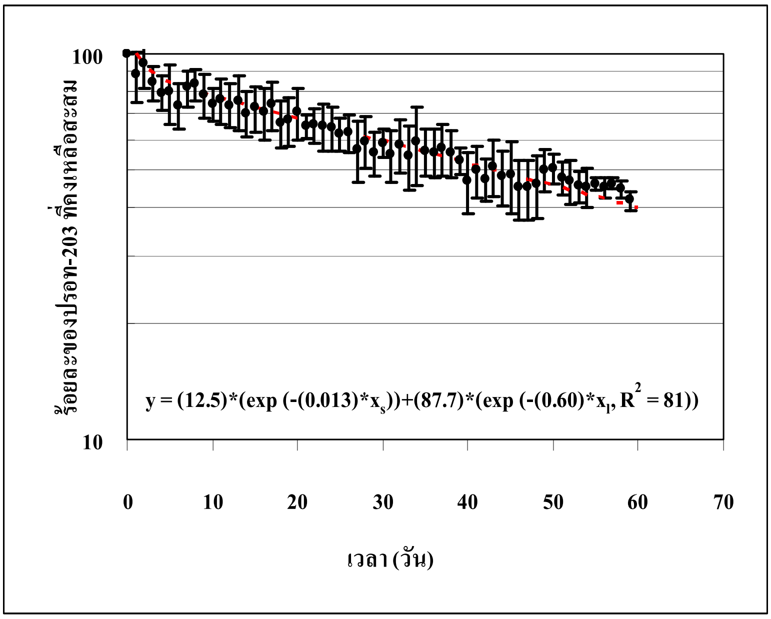


ภาพที่ 30 ร้อยละของสังกะสี-65ที่คงเหลือสะสมในการเลี้ยงหอยแครงเป็นระยะเวลา 59 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน), ของการทดลอง 5 ซ้ำ สำหรับวันที่ 1-39 การทดลอง 4 ซ้ำ สำหรับวันที่ 40-44 และการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับวันที่ 45-49

3.4.4 ปรอท-203

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 59 วัน หอยแครงสามารถขับปรอท-203 ออกจากตัวหอยแครงได้ร้อยละ 43.8 (ตารางผนวกที่ 6) ลักษณะจลนพลศาสตร์การขับปรอท-203 มีรูปแบบเป็น two-component exponential model โดยช่วงเริ่มต้นหอยแครงจะขับปรอท-203 ออกอย่างรวดเร็วคิดเป็นร้อยละ 12.5 โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพสำหรับการขับปรอท-203 ออกอย่างรวดเร็ว

เท่ากับ 8 วัน จากนั้น ปรอท-203 ที่เหลือทั้งหมดจะถูกขับออกอย่างช้าๆ โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพสำหรับการขับปรอท-203 ออกอย่างช้านี้ เท่ากับ 99.2 วัน (ภาพที่ 31 และตารางที่ 9)



ภาพที่ 31 ร้อยละของปรอท-203 ที่คงเหลือสะสมในการเลี้ยงหอยแครงเป็นระยะเวลา 59 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ สำหรับวันที่ 1-39 การทดลอง 4 ซ้ำ สำหรับวันที่ 40-44 และการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับวันที่ 45-49

3.5 การเปรียบเทียบการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

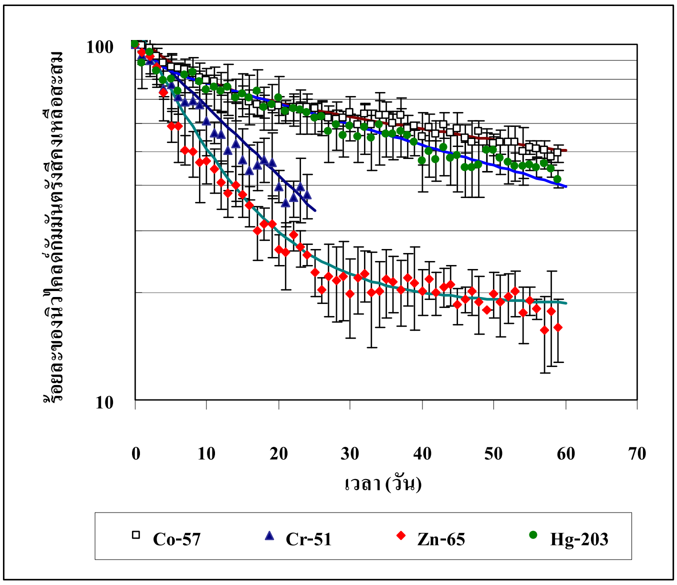
เมื่อเปรียบเทียบอัตราการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง ดังแสดงภาพที่ 32 พบว่า

ก. จลนพลศาสตร์ของการขับโคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ออกจากตัวหอยแครงมีรูปแบบ two-component exponential model เช่นเดียวกัน ขณะที่จลนพลศาสตร์การขับโครเมียม-51 เป็นแบบ linear model

ข. ในระยะเวลาทดลอง 59 วัน หอยแครงขับสังกะสี-65 ออกจากตัวหอยได้สูงสุด (ร้อยละ 83.4) ขณะที่ปรอท-203 ออกได้น้อยสุด (ร้อยละ 43.8)

ค. ประสิทธิภาพการคงอยู่ในช่วงการขับออกอย่างรวดเร็วของโคบอลต์-57 และปรอท-203 มีค่าร้อยละ 76.1 และ 87.7 ตามลำดับ กล่าวได้ว่า นิวไคลด์ทั้งสองชนิดมีการขับออกอย่างรวดเร็วในปริมาณน้อย ขณะที่สังกะสี-65 มีการขับออกอย่างรวดเร็วในปริมาณมาก โดยมีค่าประสิทธิภาพคงอยู่ในช่วงการขับออกอย่างรวดเร็วนี้เพียงร้อยละ 16.6

ง. การขับโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ออกจากตัวหอยแครงจะใช้เวลา 15 วัน ถึง 4 เดือน นั่นคือ หอยแครงสามารถสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้ได้ดี



ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การขับโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ออกจากตัวหอยแครง ในการเลี้ยงหอยเป็นระยะเวลา 59 วัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย (±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการทดลอง 5 ซ้ำ สำหรับ วันที่ 1-39 การทดอง 4 ซ้ำ สำหรับวันที่ 40-44 และการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับวันที่ 45-49

วิจารณ์

1. ซีเซียม-134

ซีเซียม-134 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันเช่นเดียวกับซีเซียม-137 นิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสองมีค่าครึ่งชีวิตค่อนข้างยาวคือ 2.1 และ 30.2 ปี โดยเมื่ออยู่ในน้ำทะเล หรือในสภาวะสารละลาย ซีเซียมจะอยู่ในรูปของไอออนที่มีประจุ+1 สมบัติของซีเซียมไอออนที่สำคัญคือ จะถูกดูดซับด้วยอนุภาคของวัตถุ (particulate matter) ได้น้อย หรือเป็น non-particle reactive ดังนั้น ไอออนของซีเซียมจึงสามารถแพร่กระจายไปตามกระแสน้ำได้ดี และเนื่องจาก ซีเซียม-134 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี ดังนั้นจึงสามารถก่อให้เกิดอันตรายได้ (Woodhead, 1997)

ได้มีการสำรวจความเข้มข้นกัมมันตภาพของซีเซียม-137 ในน้ำทะเลในภาคพื้นเอเชียแปซิฟิก ซึ่งไม่มีประวัติการเกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3 มิลลิเบ็กเคอเรลต่อลิตร (Duran *et al*., 2004) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นกัมมันตภาพของซีเซียม-134 แทน ซีเซียม-137 ที่ใช้ในการทดลองนี้ (ความเข้มข้นกัมมันตภาพเท่ากับ 1.370 เบ็กเคอเรลต่อมิลลิลิตร) มีค่าสูงกว่าระดับความเข้มกัมมันตภาพที่มีในน้ำทะเลมาก ถึง 400 เท่า อย่างไรก็ตาม แม้ว่า ความเข้มข้นกัมมันตภาพของซีเซียม-134 ที่ใช้ทดลองสูง แต่จากผลการทดลอง พบว่า หอยแครงไม่สะสม ซีเซียม-134 ผ่านทางน้ำทะเล ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fraysse et al. (2002) ที่ไม่พบการสะสมซีเซียม-134 ในหอยสองฝาน้ำจืด *Corbicula fliminea* และ การศึกษาของ Hutchins *et al.* (1998) ที่พบว่า ซีเซียมจะไม่สะสมในหอยทะเลสองฝาโดยผ่านทางน้ำทะเลหรือหากพบการสะสมแต่ก็มีในปริมาณน้อย สาเหตุที่หอยแครงไม่ สามารถสะสมซีเซียมได้เนื่องจาก เกิดการแข่งขันระหว่างซีเซียมกับไอออนของโปแตสเซียมที่มีสมบัติทางเคมีเหมือนกันและมีระดับความเข้มข้นที่สูงกว่ามาก (Bryan, 1963; Ke and Wang, 2001; Gungor, 2001)

การสะสมซีเซียมในปริมาณน้อยนี้ได้มีการรายงานโดย Heldal *et al.,* 2001 ที่ดำเนินการทดลองการรับซีเซียม-137 ของแพลงก์ตอนจำนวน 5 สายพันธุ์ ซึ่งถือว่า เป็น primary producer ในระบบนิเวศทางทะเล ผลการทดลองพบว่า แพลงก์ตอนทุกสายพันธุ์มีการสะสมซีเซียม-137 ในปริมาณน้อยมาก (ภาพผนวกที่ 8) และจากการศึกษาของ Wang *et al.* (2000) ที่ทำการศึกษาการทำนายการสะสมของซีเซียมกัมมันตรังสีโดยห่วงโซ่อาหารทางทะเล พบว่า ซีเซียมมีค่า trophic transfer น้อยกว่า 1 นั่นคือ การส่งผ่านซีเซียมไปสู่ผู้ล่าหรือสิ่งมีชีวิตในชั้นลำดับถัดไปมีค่า

น้อย ทั้งนี้โอกาสการรับซีเซียมเข้าสะสมจะมากเมื่อเกิดการฟุ้งกระจายของดินตะกอนและดินตะกอนเป็นแหล่งอาหารหลักของหอยทะเล

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาของ Ke *et al.* (2000) แสดงให้เห็นว่า การสะสมซีเซียมในหอยทะเลสองฝามีค่าสูง โดยได้ทำศึกษาการสะสมซีเซียมโดยหอยแมลงภู่ (*P.viridis*) ซึ่งพบมากในพื้นที่เขตกึ่งเขตร้อนและเขตร้อน พบว่าการสะสมซีเซียมขึ้นกับปริมาณโปแตสเซียม ซีเซียมและค่าความเค็มในน้ำทะเลและพบว่ามีค่า CF เท่ากับ 145 โดยเมื่อเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมานับว่ามีค่าสูงมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิ ความเค็ม สภาวะทดลองและขนาดของสัตว์ทดลอง

2. สทรอนเชียม-85

สทรอนเชียม-90 (ค่าครึ่งชีวิต 29 ปี) เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีหนึ่ง ที่เกิดจากการจากปฏิกิริยาฟิชชันเช่นเดียวกับซีเซียม-137และซีเซียม-134 จากการทดลองใช้ สทรอนเชียม-85 ที่สลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีแกมมา ซึ่งสะดวกต่อการวัดค่ากัมมันตภาพรังสี อีกทั้งสทรอนเชียม-85 มีค่าครึ่งชีวิตสั้น (64.8 วัน) สทรอนเชียมเมื่ออยู่ในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป ของไอออนที่มีประจุ+2 และมีประมาณร้อยละ 10 ที่อยู่ในรูปคู่ไอออนของสารประกอบของซัลเฟต คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต ฟลูออไรด์ บอเรตและไฮดรอกไซด์ (Randy, 2003) จากการทดลอง แม้ว่าจะดำเนินการทดลองการสะสมสทรอนเชียม-85 โดยให้น้ำทะเลมีความเข้มข้นกัมมันตภาพเท่ากับ 0.910 เบ็กเคอเรลต่อมิลลิลิตรเป็นระยะเวลา 26 วัน พบว่า หอยแครงไม่สะสมสทรอนเชียม-85 โดยผ่านทางน้ำทะเล ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Twining *et al.* (1995) ที่พบว่า การสะสมสทรอนเชียมเข้าสู่ร่างกายในสัตว์ทะเลจะเกิดภาวการณ์แข่งขันกับไอออนของแคลเซียมที่มีอยู่ในน้ำทะเลในปริมาณมากกว่า ทำให้โอกาสการรับหรือการเคลื่อนย้ายนิวไคลด์กัมมันตรังสีนี้เข้าสู่ระบบห่วงโซ่อาหารทางทะเลมีค่าต่ำมาก

3. โครเมียม-51

ผลการทดลองพบว่า หอยแครงสามารถรับโครเมียม-51 เข้าสะสมในร่างกายไว้ได้ดี โดยจากการทดลองการรับโครเมียม-51 เป็นเวลา 26 วัน หอยแครงสามารถสะสมโครเมียม-51ในตัวได้ถึง 52.73±8.60 เบ็กเคอเรลต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าระดับความเข้มข้นกัมมันตภาพที่มีอยู่ในน้ำทะเลจากการทดลองถึง 22 เท่า เช่นเดียวกับการศึกษาปริมาณโลหะหนักของ Ibrahim (1995) ดังปรากฏใน

ตารางผนวกที่ 8) ที่พบการสะสมของโครเมียมในหอยแครง อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่า หอยแครงจะรับโครเมียม-51 เข้าสะสมในอัตราการสะสมที่ต่ำเมื่อเทียบกับอัตราการสะสมของ ปรอท-203 โบอลต์-57 และสังกะสี-65 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chong and Wang (2000) ที่ศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมของโครเมียม สังกะสี และแคดเมียมแบบ ระยะเวลาสั้น (short-term exposure) เข้าสะสมในหอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) และหอยทะเล Manila clam *Ruditapes sp.* โดยผ่านทางน้ำทะเลโดยให้ *P.viridis* และหอย clam *Ruditapes sp.* สัมผัสกับแคดเมียม-51 เป็นระยะเวลา 9 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่า หอยแครงสะสม โครเมียม-51 ในอัตราต่ำ โดยอัตราการสะสมโครเมียมมีค่าต่ำสุด (k_u=0.039 l/g/d) และเมื่อ เปรียบเทียบกับสังกะสี (k_u =0.637 l/g/d) จะมีค่าต่ำกว่าเท่ากับ 16 เท่า โดยมีจลนพลศาสตร์การ สะสมมีลักษณะแบบเชิงเส้นและศึกษาการขับโครเมียม-51 ออกเป็นเวลา 35 วัน พบว่า จลนพลศาสตร์การขับออกมีรูปแบบ two-component exponential model รูปแบบจลนพลศาสตร์ แตกต่างจากการทดลองนี้ อาจมีสาเหตุมาจากระยะเวลาการทดลองแตกต่างกัน และการสะสม โครเมียมในอัตราต่ำผกว่าสังกะสีนี้ยังพบได้ จากการทดลองการสะสมแคดเมียมของหอยแมลงภู่ *Septifer vergatus ของ* Wang and Dei (1999)

Lee *et al.* (1998) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมโครเมียมและสังกะสีของหอยทะเล สองฝา *Potamocorbula amurensis* และ *Macoma balthica* ด้วยระยะเวลาสั้น คือ 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าหอยสองฝาทั้งสองชนิดมีอัตราการสะสมโครเมียมต่ำ (0.028 และ 0.006 ug/g-dry wt/d ตามลำดับ) เช่นเดียวกับการศึกษานี้ โดยและเมื่อเปรียบเทียบกับสังกะสี (0.425 ug/g- dry wt /d) และแคดเมียม (0.091 ug/g- dry wt /d ตามลำดับ) จะมีค่าต่ำกว่าคือเท่ากับ 15 และ5 เท่า ตามลำดับ และค่าความเค็มของน้ำทะเลมีผลต่อการสะสม โครเมียม และจากการศึกษาการขับ โครเมียมเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ พบรูปแบบจลนศาสตร์การขับโครเมียมเป็นแบบ two-component exponential model เช่นเดียวกับงานศึกษาของ Chong and Wang (2000) และผลการทดลองนี้

4. โคบอลต์-57

หอยแครงมีความสามารถในการรับและสะสมโคบอลต์-57 ได้ดีมาก โดยตลอดระยะเวลา 26 วัน สามารถรับโคบอลต์-57 เข้าสะสมในร่างกายไว้ได้ 28.8±4.94 เบ็กเคอเรลต่อกรัม ซึ่งสูง กว่าความเข้มข้นกัมมันตภาพที่มีในน้ำทะเลที่ใช้จากการทดลองมากกว่า 500 เท่า และมีค่า

ประสิทธิภาพการคงอยู่ถึงร้อยละ 76 โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพสำหรับการขับออกอย่างช้าเป็นระยะเวลานานถึง 4 เดือน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษากับหอยสองฝาชนิดอื่น โดย Harrison (1973) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการสะสมโคบอลต์-60 ของหอยทะเลสองฝา clam *Mya Arenaria* ในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถรับโคบอลต์-60 เข้าสะสมในร่างกายได้ถึง 200 เท่า เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่มีในน้ำทะเล และโคบอลต์จะไปสะสมที่เปลือกมากกว่าเช่นเดียวกัน แต่พบว่า ค่า CF มีค่าต่ำคือ 221.4±7.3 และมีจลนพลศาสตร์การขับออกมีลักษณะแบบ one-component exponential model แต่มีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับออกอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 วัน โดยสาเหตุที่ระดับความสามารถในการสะสมและการขับโคบอลต์แตกต่างจากการทดลองนี้ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของสัตว์ทดลองและอุณหภูมิซึ่งอาจมีส่วนต่อจลนพลศาสตร์การสะสมโคบอลต์ของสัตว์ทดลองชนิดนี้ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของ Hutchin *et al.* (1998) ไม่พบความแตกต่างของประสิทธิภาพการคงอยู่ของโคบอลต์-57 ในหอยสองฝา *Macoma balthica* ในสภาวะสารละลายที่อุณหภูมิ 2 และ 12 องศาเซลเซียส

ขณะที่รูปแบบจลนพลศาสตร์การสะสมและการขับโคบอลต์-60 ของการทดลองนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Weer (1973) ที่พบว่า การสะสมโคบอลต์-60 ของหอยแมลงภู่ (*Mytilus edulis* L.) โดยผ่านทางน้ำทะเลในระยะเวลา 8 วัน มีรูปแบบจลนพลศาสตร์การสะสมเป็น one-component first-order kinetic และค่า CF ของเปลือกและอวัยวะทั้งตัวมีค่าเท่ากับ 16±8 และ 32±9 ตามลำดับ (ภาพผนวกที่ 10) และพบว่าจลนพลศาสตร์ของการขับออกเป็นแบบ two-component exponential model เช่นเดียวกัน และมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับออกอย่าง รวดเร็วและอย่างช้าเป็นเวลา 6 วัน และ 50-72 วัน ตามลำดับ (ภาพผนวกที่ 11) ขณะที่ Hutchin *et al.* (1998) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การขับโคบอลต์-57 ของหอยสองฝา *Macoma balthica* ในสภาวะสารละลายที่อุณหภูมิ 2 และ 12 องศาเซลเซียส พบว่า มีรูปแบบของจลนพลศาสตร์ที่แตกต่างไปจากผลการทดลองนี้คือ พบจลนพลศาสตร์ของการขับโคบอลต์-57 ออกเป็นแบบ 3-component exponential model หรือ 3 ช่วงเวลา ซึ่งเช่นกับการศึกษาของ Wang *et al.* (1996) โดยมีค่าประสิทธิภาพคงอยู่สะสมและค่าครึ่งชีวิตของการขับออกอย่างรวดเร็ว อย่างช้าและช้าที่สุดเท่ากับ 18±6, 14 วัน 63±28, 5.3 วัน และ 30±12, 35 วัน ตามลำดับ

Fisher *et al.* (1996) ได้ศึกษาการขับโคบอลต์ในรูปสารประกอบอินทรีย์ (^{57}Co-labeled-cobalamine) และโคบอลต์ในรูปไอออน ($^{60}Co^{2+}$) ออกจากหอยแมลงภู่

Mytilus galloprovincialis ในห้องปฏิบัติการและภาคสนามเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า ประสิทธิภาพคงอยู่ของโคบอลต์ในรูปสารประกอบอินทรีย์ในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 และภาคสนามมีค่าเท่ากับร้อยละ 60 ซึ่งมีค่าสูงกว่าโคบอลต์ในรูปไอออน (ในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับร้อยละ 46 และภาคสนามมีค่าเท่ากับร้อยละ 44) และมีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาประสิทธิภาคงอยู่ของโคบอลต์ของการทดลอง นี้ (ร้อยละ 76.1) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของชนิดของสัตว์ทดลองและสภาวะการทดลอง (Nolan *et al*., 1992; Reinfelder *et al*., 1997; Wang and Dei, 1999; Chong and Wang, 2001)

การศึกษาการกระจายตัวของโคบอลต์ พบว่า จะไปสะสมที่เปลือกมากกว่าส่วนอวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Fisher *et al.* (1996) และ Hutchin *et al.* (1998) สาเหตุที่มีการดูดซับโคบอลต์ที่เปลือกมากกว่า เนื่องจากเกิดการดูดซับในสภาวะสารละลายจะไม่มีอาหาร ขณะเดียวกันบนโครงสร้างเปลือกหอยจะไม่มีกระบวนเมตาบอลิซึมเกิดขึ้น (non-metabolic active) ดังนั้นกระบวนการเมตาบอลิซึมของโคบอลต์จึงไม่เกิดขึ้นที่ส่วนอวัยวะทั้งตัว นั่นคือ โคบอลต์ไม่ถูกส่งผ่านด้วยอาหาร การดูดซับจึงเกิดขึ้นที่เปลือกแป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นกระบวนดูดซับโคบอลต์อันดับแรกที่เกิดขึ้นในสภาวะสารละลาย และเมื่อมีการดูดซับโคบอลต์ในส่วนอวัยวะทั้งตัว โคบอลต์จะสะสมที่ระบบย่อยอาหารและไต (Van Weers, 1973) ดังภาพผนวกที่ 12

5. สังกะสี-65

หอยแครงมีความสามารถในการรับและสะสมสังกะสี-65 ได้ดี โดยตลอดระยะเวลา 26 วัน สามารถรับเข้าสะสมในร่างกายไว้ได้ 165.80±24.96 เบ็กเคอเรลต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นที่มีในน้ำทะเลจากการทดลองถึงกว่า 90 เท่า ความสามารถในการสะสมสังกะสี-65 ของหอยแครงนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับหอยสองฝาชนิดอื่นที่พบว่า สามารถรับสังกะสีและสะสมไว้ภายในร่างกายได้ดี (Van Weers, 1973; Fisher *et al.* ,1996; Lee *et al*., 1998; Wang *et al*.,1999)

โดย Van Weers (1973) ศึกษาการขับสังกะสี-65 ในหอยทะเลสองฝา (*Mytilus edulis* L.) ที่อุณหภูมิ 14-17 องศาเซลเซียส พบว่า สังกะสี-65 จะสะสมที่อวัยวะทั้งตัวและเปลือกเช่นเดียวกัน โดยร้อยละ 70-88 จะสะสมที่อวัยวะทั้งตัวและมีค่า CF ในอวัยวะทั้งตัวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 150±25 และในส่วนเปลือกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 70±11 (ภาพผนวกที่ 13) และพบว่า หอยชนิดนี้สามารถขับ

สังกะสี-65 ออกอย่างรวดเร็วด้วยค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพ 8 วัน โดยจลนพลศาสตร์ของการขับออกมีรูปแบบ two-component exponential model และมีค่าครึ่งชีวิตชีวภาพของการขับออกอย่างเร็วและอย่างช้าเป็นระยะเวลา 3-4 วัน และ 48-60 วัน ตามลำดับ (ภาพผนวกที่ 14) โดยความแตกต่างของค่าครึ่งชีวิตชีวภาพของการขับออกอาจมีสาเหตุมาจากสภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน

ขณะที่ Fisher *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาการสะสมและประสิทธิภาพคงอยู่ของสังกะสี-65 ของหอยแมลงภู่ (*Mytilus galloprovincial*) ในน้ำทะเลพบว่า เมื่อหอยทะเลสองฝาชนิดนี้รับสังกะสี-65 เข้าไปในร่างกายแล้วจะขับออกโดยมีจลนพลศาสตร์ของการขับออกแบบ two-component model เช่นเดียวกัน แต่มีประสิทธิภาพการคงอยู่ของสัดส่วนการขับออกแบบช้ามีค่าเฉลี่ยร้อยละ 54 ซึ่งแตกต่างจากค่าประสิทธิภาพการคงอยู่ของหอยแครงที่การขับสังกะสี-65 ออกอย่างช้าเพียงร้อยละ 16.6 และเช่นเดียวกับผลการทดลองของ Lee *et al.* (1998) ที่ศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมสังกะสีของหอยทะเลสองฝา *Potamocorbula amurensis* และ *Macoma balthica* ด้วยระยะเวลาสั้น คือ 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า หอยสองฝาทั้งสองชนิดมีความสามารถในการสะสมสังกะสีสูง โดยมีค่าคงที่อัตราสะสมเท่ากับ 0.425 และ 0.091 ug/g- dry wt /d ตามลำดับ และจากการศึกษาการขับสังกะสีเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ พบรูปแบบจลนศาสตร์การขับสังกะสีเป็นแบบ two-component exponential model เช่นเดียวกับงานศึกษาของ Chong and Wang (2000) และผลการทดลองนี้

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การรับสังกะสี-65 เข้าสะสมในตัวหอยแครงด้วยอัตราสูงและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วด้วยเวลา 15 วัน อีกทั้งการทดลองยังคงดำเนินต่อไปอีกเป็นระยะเวลากว่า 10 วัน ขณะที่หอยแครงมีการกรองน้ำทะเลอยู่ตลอดเวลา การรับสังกะสี-65 เข้าสะสมขณะที่เลยช่วงระยะเวลาที่เกิดสมดุลแล้ว จลนศาสตร์การสะสมของสังกะสี-65 มีลักษณะแบบ one-component first order kinetic และมีลักษณะแบบ fast component ซึ่งกล่าวได้ว่า adsorption site ของ เซลล์ของดูดซับด้วยสังกะสี-65 อย่างรวดเร็ว และไม่สามารถดูดซับด้วยสังกะสี-65 เข้าในตัวหอยแครงได้อีกเมื่อ adsorption site ของเซลล์ถูกดูดซับหมด การรับสังกะสี-65 เข้าไปด้วยการกรองอย่างต่อเนื่องของหอยแครง จะทำให้มีการรับสังกะสี-65 เข้าอย่างต่อเนื่องและมีการจับกับเนื้อเยื่อของร่างกายแบบหละหลวมในปริมาณมาก และเมื่อนำหอยแครงมาเลี้ยงในน้ำทะเลที่ ไม่มีสังกะสี-65 ในช่วงการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีออกจากตัว ปริมาณของสังกะสี-65 ที่จับเนื้อเยื่อของหอยแครงแบบหละหลวมนั้น จึงถูกพัดพาออกจากเซลล์เนื้อเยื่อโดยน้ำทะเลได้ง่ายและในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพการคงอยู่มีเพียงร้อยละ 16.6 เท่านั้น

ซึ่งแตกต่างจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่นที่จลนพลศาสตร์การสะสมยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลและมีลักษณะจลนพลศาสตร์การสะสมแบบ slow component (IAEA, 1997)

6. ปรอท-203

หอยแครงมีความสามารถในการรับและสะสมปรอท-203 ได้ดีโดยตลอดระยะเวลา 26 วัน สามารถรับปรอท-203 เข้าสะสมในร่างกายไว้ได้ 38.37$\pm$15.80 เบ็กเคอเรลต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นที่มีในน้ำทะเลที่ใช้ในการทดลองมากกว่า 160 เท่า และมีการสะสมอยู่ในร่างกายได้เป็นระยะเวลานาน โดยมีประสิทธิภาพการคงอยู่ถึงร้อยละ 87 มีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับออกอย่างช้าๆ เป็นระยะเวลานานกว่า 3 เดือน ความสามารถในการสะสมปรอท-203 ของหอยแครง *A. granosa* นี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษาในหอยทะเลสองฝาชนิดอื่นโดย Otchere *et al.* (2003) พบว่า หอยแครง (*A. senilis)* หอยแมลงภู่ (*P. perna*) และหอยนางรม (*C. tulipa*) ที่อาศัยอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลมีความสามารถในการสะสมปรอทได้ดี และผลการศึกษา ของ Inza *et al.* (1997) ที่พบการสะสมปรอททั้งจากน้ำทะเลและตะกอนของหอยสองฝา Asiatic clam *Corbicula fluminea* โดยปรอท-203 ประมาณร้อยละ 90 สามารถสะสมอยู่ได้ในร่างกายของหอยแครงได้เป็นระยะเวลามากกว่า 3 เดือน และมีลักษณะการคงไว้ในร่างกายยาวนาน ทั้งนี้เนื่องจากปรอทเป็นโลหะที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบฮาไลด์และซัลไฟด์ได้ดี เช่น $HgCl_2$ และ HgS ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วและสามารถอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายในไขมัน (lipophilic complexes) ในเซลล์สิ่งมีชีวิตได้ โดยสารประกอบนี้จะเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้แบบ passive transport (Blust, 2002)

7. การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครง

7.1 รูปแบบจลนพลศาสตร์ของการสะสมของนิวไคลด์ทั้ง 4 ชนิด มีความเหมาะสมในการอธิบายในรูปแบบ one-component fisrt-order kinetic model อย่างไรก็ตาม นิวไคลด์ทั้ง 4 ชนิด ยังคงมีความตกต่างกันโดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 จำพวกคือ สังกะสี-65 มีลักษณะแบบ fast component คือ สังกะสีจะถูกสะสมในหอยแครงและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว ส่วนปรอท-203 โคบอลต์-57และโครเมียม-51 มีลักษณะแบบ slow component ซึ่งจะใช้ระยะเวลานานกว่าจะเข้าสู่สภาวะสมดุล พฤติกรรมดังกล่าวของสังกะสีจะพบได้ในสัตว์ทดลองอื่นซึ่งจะเห็นได้จากค่าคงที่อัตราการรับมีค่าสูงกว่าโลหะอื่น (ตารางผนวกที่ 9)

7.2 งานวิจัยนี้ได้จำลองการศึกษาการเคลื่อนย้ายของธาตุต่างๆ ในรูปของไอออน ดังนั้น กลไกการเคลื่อนย้ายจึงเป็นแบบ passive diffusion transport เป็นส่วนใหญ่ สังกะสีมีค่าคงที่อัตราการรับสูงสุดเมื่อเทียบกับโครเมียมและโคบอลต์ ซึ่งสอดคล้องกับกับผลการทดลองของ Wang and Fisher (1996), Wang and Dei (1999) และ Lee *et al.* (1998) โดยสังกะสีเข้าสู่เซลล์แล้วจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโปรตีนที่มี SH-containing ligand ที่มีในเซลล์ ได้แก่ methionine (MT) ดังนั้น กลไกการเคลื่อนย้ายเข้าสู่เซลล์ของสังกะสีจึงเป็นไปในลักษณะ faciliatated process โดยเกิดเป็นสารประกอบกับ SH-containing ligand สำหรับหารเคลท่อนย้ายเข้าสู่ภายในเซลล์ (internal transport) ขณะที่โครเมียมอาจจะมีกลไกการเข้าสู่เซลล์แบบ passive dissusion (Wang and Dei, 1999)

7.3 ภาพรวมของค่าคงที่อัตราการรับของโครเมียม สังกะสีและปรอทที่ได้จากการทดลองนี้กับหอยแครง *A. granosa* ซึ่งเป็นหอยประเภท clam มีค่าต่ำกว่าหอยแมลงภู่ หรือหอยประเภท mussel (ตารางผนวกที่ 9) เช่นเดียวกับการทดลองของ Lee *et al.* (1998) ทั้งนี้ ยังไม่ทราบเหตุผลที่แน่ชัด เนื่องจากความสามารถในการสะสมโลหะหนักของหอยทะเลสองฝามีปัจจัยที่สำคัญหลายอย่างที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะ ปัจจัยด้านความสามารถในการกรอง

7.4 จลนพลศาสตร์การสะสมของสังกะสีเป็นมีลักษณะแบบ fast component คือ เมื่อมีการรับสังกะสีอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ adsorption sites ดูดซับสังกะสีจนกระทั่งเมื่อถึงวเลาหนึ่งหมดพื้นที่ของ adsorption sites ทำให้สังกะสีที่มากเกินพอหลุดออกมาอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงพบอัตราการขับสังกะสีออกจากหอยแครงสูงด้วยระยะเวลาสั้นดังเช่นผลการทดลองนี้

7.5 รูปแบบของจลนพลศาสตร์ของการขับโลหะหนักมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ระยะเวลาทดลอง ชนิดของโลหะหนัก หรือชนิดของสารประกอบของโลหะหนัก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่รูปแบบของจลนพลศาสตร์การขับออกจะเป็นแบบ exponential loss kinetic model ซึ่งอาจมี 2 ส่วนของการขับออกดังเช่นการทดลองนี้ของสังกะสี ปรอทและโคบอลต์ หรือเป็นแบบ 3 ส่วน (Fisher *et al.*, 1996)

7.6 หอยแครง *A.granosa* มีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับสังกะสีและโคบอลต์มีค่ายาวนานกว่าของหอยแมลงภู่ ดังตารางผนวกที่ 10

7.7 จาการทดลองนี้ได้ทำการคำนวณค่า CF ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้ง 4 ชนิดในส่วนอวัยวะทั้งตัว (ตารางผนวกที่ 11) พบว่า มีค่าแตกต่างจากที่รายงานไว้ (IAEA, 2004) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสภาวะการทดลองและชนิดของสัตว์ทดลองที่แตกต่างกัน (Fisher *et al.* (1999); Ke and Wang (2001)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาศักยภาพในการรับมลสารเข้าสะสมและการขับมลสารออกจากร่างกายของสิ่งมีชีวิต เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการประเมินถึงความเหมาะสมของการใช้สิ่งมีชีวิตนั้นๆ เป็นตัวดัชนีบ่งชี้ทางชีวภาพเพื่ออธิบายการปนเปื้อนมลสารในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งข้อมูลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง สำหรับโครงการเฝ้าตรวจติดตามการปนเปื้อนของมลสารในชายฝั่งทะเล ศักยภาพการรับมลสารและการขับออกของสิ่งมีชีวิตในแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งหอยทะเลสองฝาเป็นสัตว์ทะเลชนิดหนึ่งและเป็นที่รู้จักกันดีว่ามีความเหมาะสมในการเป็นตัวดัชนีบ่งชี้ทางชีวภาพ

สำหรับการทดลองนี้ เป็นการศึกษาศักยภาพของหอยแครง *A. granosa* ซึ่งมีการเพาะเลี้ยงอยู่ตามชายฝั่งทะเลของประเทศไทย การดำรงชีพของหอยแครงจะอาศัยอยู่บนกับพื้นโคลนดินและสามารถฝังตัวอยู่ใต้โคลนดินได้ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า หอยแครงมีโอกาสการได้รับมลสารเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางผ่านที่สำคัญคือ ผ่านทางน้ำทะเล ผ่านทางดินและผ่านทางอาหารที่มีมลสารปนเปื้อน สำหรับการทดลองนี้ ได้มุ่งเน้นศึกษาศักยภาพในการสะสมมลสารของหอยแครงผ่านทางน้ำทะเล โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ไม่พบการสะสมของซีเซียม-134 และสทรอนเชียม-85 ผ่านทางน้ำทะเลในหอยแครง

2. หอยแครงมีความสามารถในการสะสมโคบอลต์-57 โครเมียม-51 ปรอท-203 และสังกะสี-65 ได้ดี โดยจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมเป็นเวลา 26 วัน พบว่า จลนพลศาสตร์การสะสมของโคบอลต์-57 โครเมียม-51 และ สังกะสี-65 ของหอยแครงมีรูปแบบ one-component exponential model ยกเว้น โดยจลนพลศาสตร์การสะสมของสังกะสี-65 เข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 16 วัน ส่วนจลนพลศาสตร์สะสมของโคบอลต์-57 และโครเมียม-51 นั้น ปรากฏเพียงแนวโน้มเข้าสู่สภาวะสมดุล และจากการประมาณค่า พบว่า จะเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 30.4 วัน และ 44.9 วัน ตามลำดับ สำหรับการสะสมของปรอท-203 และปรอท-203 มีจลนพลศาสตร์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งกล่าวได้ว่า หอยแครงสามารถรับและสะสมปรอท-203 เพิ่มได้อีก

3. ค่า CF ของนิวไคลด์ที่พบว่ามีการสะสมในตัวหอยแครง (whole body) ที่ระยะเวลาทดลอง 26 วัน มีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ดังนี้ โคบอลต์-57 (554.3±94.8) ปรอท-203 (166.0±77.0) สังกะสี-65 (93.4±14.1) และโครเมียม-51 (22.3±6.4)

4. อัตราการรับนิวไคลด์เข้าสะสมในหอยแครงเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้ โคบอลต์-57 (34.1 ต่อวัน) สังกะสี-65 (17.9 ต่อวัน) ปรอท-203 (6.5 ต่อวัน) และโครเมียม-51 (1.5 ต่อวัน) และค่าคงที่อัตราการรับเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้ สังกะสี-65 (0.2 ต่อวัน) โครเมียม-51 (0.0645 ต่อวัน) และ โคบอลต์-57 (0.0486 ต่อวัน)

5. เมื่อหอยแครงสะสมโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ในส่วนอวัยวะทั้งตัวและเปลือกโดยพบว่า โคบอลต์-57 จะสะสมที่เปลือกมากกว่าในส่วนอวัยวะทั้งตัว ส่วนปรอท-203 จะสะสมในส่วนอวัยวะทั้งตัวเป็นส่วนใหญ่

6. ข้อมูลการศึกษาการขับโครเมียม-51 ออกจากตัวหอยแครงด้วยระยะเวลาเพียง 24 วัน พบว่า มีรูปแบบจลนพลศาสตร์ของการขับแบบเชิงเส้น โดยมีค่ามีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับออกเป็นระยะเวลา 15 วัน

7. จลนพลศาสตร์ของการขับโคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองแบบ two-component exponential model โดยมีค่าประสิทธิภาพการคงอยู่ประมาณร้อยละ 76.1, 16.6 และ 87.7 ตามลำดับ ซึ่งสังกะสีซึ่งสามารถถูกขับ สังกะสี-65 ออกจากตัวหอยได้รวดเร็วในปริมาณกว่าร้อยละ 80

8. หอยแครงมีความสามารถในการสะสมโคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ได้ดี โดยมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับออกอย่างรวดเร็วเป็นระยะเวลา 5.8, 8.0 และ 5.1 วัน ตามลำดับ และมีค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพของการขับออกอย่างช้าเป็นระยะเวลา 124.6, 118.6 และ 99.2 วัน ตามลำดับ

9. ภาพรวมของงานศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมปรอท สังกะสี โคบอลต์และโครเมียม แสดงให้เห็นว่า หอยแครงสามารถสะสมโครเมียม โคบอลต์ ปรอทและสังกะสีได้ดีและคงอยู่ในตัวเป็นระยะเวลานาน จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้หอยแครงเป็นดัชนีทางชีวภาพสำหรับการติดตามตรวจสอบและการประเมินระดับคุณภาพน้ำในสภาวะแวดล้อมชายฝั่งทะเล

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มการศึกษาทางผ่านของการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

การดำรงชีพของ หอยแครงจะอาศัยอยู่บนพื้นดินตะกอนใต้ท้องน้ำทะเล ดังนั้น จึงมีโอกาสรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวได้ 3 ทางผ่านคือ ทางผ่านจากการสัมผัสดินตะกอนที่อาศัยอยู่ ทางผ่านจากน้ำทะเล และทางผ่านจากอาหาร ที่หอยแครงกรองเข้าสู่ตัว โดยทั้ง 3 ทางผ่าน อาจทำให้มีการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวหอยแครงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงควรศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้ง 3 ทางผ่าน

2. การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสกับมลสาร

การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสกับนิวไคลด์กัมมันตรังสี ทำให้หอยสองฝามีโอกาสนิวไคลด์กัมมันตรังสีเข้าสะสมในตัวมากขึ้น สำหรับการทดลองนี้ พบว่า หอยแครงมีอัตราการสะสมโครเมียม-51 ต่ำ ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการขับออกจึงดำเนินการศึกษาได้เพียงระยะเวลาสั้น เนื่องจาก ค่ากัมมันตภาพของโครเมียม-51ที่สะสมในตัวหอยแครงมีค่าน้อย กอปรกับโครเมียม-51มีค่าครึ่งชีวิตสั้นและรูปแบบของจลนพลศาสตร์การขับออกของโครเมียม-51 อาจเปลี่ยนไปได้ ถ้ามีการศึกษาการขับโครเมียม-51 ออกจากตัวหอยแครง ใช้ระยะเวลาทดลองมากขึ้น ดังนั้น จึงควรทดลองโดยเพิ่มความเข้มข้นกัมมันตภาพของโครเมียม-51 หรือระยะเวลาการทดลองการรับโครเมียม-51ให้นานขึ้น

3. ประวัติการสัมผัสมลสาร

ผลจากการรับและสะสมมลสารชนิดหนึ่งอาจส่งผลให้การรับและสะสมมลสารอีกชนิดหนึ่งเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ (metal-metal interaction) เช่น สังกะสีกับแคดเมียมหรือเงินกับปรอท ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้อาจมีกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (ligand complex induction) หรือจากกลไกการควบคุมที่มีสาเหตุมาจากความเข้มของมลสารที่มีอยู่ในเซลล์

4. เพิ่มการศึกษาชนิดของสายพันธุ์ของหอยแครง

ควรศึกษาผลของชนิดสายพันธุ์ของหอยแครงต่อจลนพลศาสตร์การสะสมโลหะหนัก ทั้งนี้เนื่องจากพบว่า สายพันธุ์ของหอยสองฝามีผลต่อจลนพลศาสตร์การสะสมของมลสาร

5. ชนิดของสารประกอบทางเคมีของโลหะหนัก

ชนิดของสารประกอบของโลหะหนักมีผลต่อจลนพลศาสตร์การสะสมโลหะหนักของหอยแครง เช่น โดยในธรรมชาติพบว่า โคบอลต์ ปรอท จะอยู่ในรูปทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น Colamine กับ $CoCl_2$ หรือ CH_3Hg กับ Hg Cl_2 ดังนั้น การศึกษาจลนพลศาสตร์การสะสมของความแตกต่างของสารประกอบโลหะหนักจะทำให้ทราบถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายและกลไกของโลหะหนักได้

6. การศึกษากลไกการสะสมและการขับโลหะหนักออกในแต่ละอวัยวะ

การทดลองนี้ ดำเนินการศึกษาการกระจายของโลหะหนักที่เข้าสะสมที่เปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ของหอยแครง การเพิ่มขอบเขตของการศึกษาการกระจายของโลหะหนักในแต่ละชนิดของอวัยวะ จะทำให้ทราบถึงกลไกการเคลื่อนย้ายและความจำเพาะของชนิดโลหะหนักกับการสะสมในแต่ชนิดของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะของสิ่งมีชีวิตได้

7. เพิ่มวิธีการตรวจสอบการกระจายของโลหะหนัก

การศึกษาการกระจายของโลหะหนักในอวัยวะในหอยแครงโดยใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น autoradiographic technique นอกจากทำให้ทราบถึงกลไกการเคลื่อนย้ายโลหะหนักแล้ว จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโลหะหนักเมื่อเข้าสู่ในเซลล์ได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **โครงการสำรวจคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งบริเวณฝั่งทะเลอันดามันและอ่าวไทยด้านตะวันตก**. เล่มที่ 1/5.

บพิธ จารุพันธุ์ และนันทพร จารุพันธุ์. 2546. **สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง 2**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชิน อุดมสมพร. 2549. การตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีแกมมาในน้ำทิ้ง. ใน **เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร Qualification Course for Radiation Safety Officer ครั้งที่ 1**. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). กรุงเทพฯ.

ลัดดา วงศ์รัตน์ 2543. **คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Alan, M.K. 2003. Paleos : **The Trace of Life on Earth**. Bivalvia. http://www.palaeos.com/Invertebrates/Molluscs/Bivalvia/Bivalvia.html. 18 August 2005.

Anandraj, A., D.J. Marshall, M.A. Gregory, T.P. McClkg. 2002. Metal accumulation, filtration and O_2 uptake rates in the mussel *Perna perna* (Mollusca: Bivalvea) exposed to Hg^{2+}, Cu^{2+} and Zn^{2+}**. Comparative Biochemistry and Physiology Part C**. 132: 355-363.

Blust, R. (2002). **Models for the bioaccumulation of metals in aquatic organisms**. pp. 71-71. In B. Federic. **Metal and radionuclides bioaccumulation in marine organisms**. CIESM, 16 boulevard de Suisse, Monaco. Cited Simkiss, K. and Tylor, M.G. (1989). **Metal fluxes across the membrane of aquatic organisms**. Rev. Aquat. Sci. 1: 173-188.

Boisson, F., M.G.J.Harlt, S.W.Fowler and C. Amiard-Triquet. 1998. Influence of chronic exposure to silver and mercky in the filed on the bioaccumulation potential of the bivalve *Macoma balthica*. **Marine Environmental Research**. 45: 325-340.

Brown, C.L. and S.N. Luoma. 1995. Use of the ekyhaline bivalve *Potamocorbula amkensis* as a biosentinel species to assess trace metal contamination in San Francisco Bay. **Mar. Ecol. Prog. Ser**. 124: 129-142.

Brownell, G.L., M. Berman, J.S. Robertson. 1986. Nomenclature for tracer kinetics. **Int. J. Appl. Radiat. Isotopes** 19: 249-262.

Bryan, G.W. 1963. The accumulation of radioactive cesium by marine invertebrates. **Journal of Marine Biology Association**, UK. 43: 519-539.

Dame, R.F. 1996. **Ecology of Marine Mussels**: An Ecosystem Approach. CRC marine science series.

Duran, E.B.,P.P., Povinec, S.W., Fowler, P.L., Airey and G.H., Hong. 2004. ^{137}Cs and $^{239+240}$Pu levels in the Asia-Pacific region seas. **Environmental Radioactivity**. 76: 139-160.

Fisher, N.S., J.-L. Teyssie, S.W. Fowler and W.-X. Wang. 1996. Accumulation and retention of metals in mussel from food and water: A comparison under field and laboratory conditions. **Environ. Sci. Technol**. 30: 3232-3242.

Fisher, N.S., S.W. Fowler, F. Boisson, J. Carrol, K. Rissanen, B. Salbu, T.G. Sazykina and K.-L. Sjoeblom. 1999. Radionuclide bioaccumulation factor and sediment partition coefficient in Artic Seas subject to contamination from dumped nuclear waste. **Environ. Sci. Technol**. 33: 1979-1982.

Fowler, S.W. 1986. Heavy metals and radionuclides transfer and transport by marine organisms. **Symposia Biologica Hungarica**. 29: 191-206.

Fowler, S.W. and J-L.Tyssie. 1997. Assimilation and excretion of selected heavy metals and radionuclides ingested by seastars. **Radioprotection-Colloques**. 32, C2: C2-717-C2-323.

Fraysse, B., J.-B.Baudin, J.Garnier-Laplace, C.Adam and A.Boudou. 2002. Effect of Cd and Zn waterborn exposure on the uptake and depuration of ^{57}Co, ^{110m}Ag and ^{134}Cs by Asiatic clam (*Corbicula fluminea*) and the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*)-whole organism study. **Environmental Pollution**. 118 (2002): 297-306.

Gungor, N., B.Tugrul, S.Topcuoglu and E.Gungor. 2001. Experimental studies on the biokinetics of ^{137}Cs and ^{241}Am in mussels (*Mytillus galloprovincialis*). **Environment International**. 27: 259-264.

Harrison, F.L. 1973. Accumulation and loss of cobalt and cesium by the marine clam, *Mya Arenaria,* under laboratory and field conditions. **Proceeding of a Symposium on the Interaction of Radioactive Contaminants with the Constituents of the Marine Environment**. IAEA. 786.

Heldal, H.E., I.Stupakoff and N.S. Fisher. 2001. **Bioaccumulation of Cs and Co by five marine phyoplankton species**. Joknal of Enviromental Radioactivity. 57: 231-236.

Hudson, R.J.M. 1998. Why aqueos species control the rates of trace metal uptake by aquatic biota? Observations and predictions of non-equilibrium effects**.** **The Science of the Total Environment**. 219: 95-115.

Hutchin, D.A., I.Stupakoff, S. Hook, S.N. Luoma and N.S.Fisher. 1998. Effects of arctic temperature on distribution and retention of the nuclear waste radionuclides ^{241}Am, ^{60}Co and ^{137}Cs in the bioindicator bivalve *Macoma baltica*. **Marine Enviromental Research**. 45 (1): 17-28.

Intergovernmental Oceanographic Commission. 2000. **Ad Hoc benthic indicator group: Result of initial planning**. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No. 57. 13.

International Atomic Energy Agency. 1975. **Design of radiotracer experiments in marine biological systems**. Technical Reports Series No. 167. 300.

International Atomic Energy Agency. 1997. **Strategies and Methodologies for Applied Marine Radioactivity Studies.** Training Course Series No.7. 377.

International Atomic Energy Agency. 2004. **Sediment distribution coefficients and Concentration factors for biota in the marine environment**. Technical Reports Series No. 442. 95.

IAEA and ANSTO. 2006. **Distance Learning Materials: Radiation Protection**. (CD Rom). Office of Atoms for Peace. Bangkok.

Ibrahim, N. (1995). Trace element content of Malaysia cockles (*Anadara granosa*). **Food Chemistry**. 54: 133-135.

Inza, B., F. Ribeyre, R. Maky-Brachet and A. Boudou. 1997. Tissue distribution of inorganic mercury, methylemercury and cadmium in the Asiatic clam (*Corbicula fluminea)* in relation to the contamination levels of the water column and sediment. **Chemoshere.** 35(12): 2817-2836.

Inza, B., Ribeyre, F. and Boudou, A. 1998. Dynamics of cadmiun and mercury compounds (inorganic mercury or methylmercury): uptake and depuration in *Corbicula fluminea*. Effect of temperature and pH. **Aquatic Toxicology**. 43: 273-285.

Jacob, D.G. 1983. **Man-made sokces released to the environment**, pp. 27-37. In The Nineteenth Annual Meeting on Environmental Radioactivity, National Council on Radiation Protection and Measurements, Woodmonth, Bethesda.

Jamil, K. 2001**. Bioindicator and Biomarkers of Environmental Pollution and Risk Assessment**. Science Publishers, Inc., New Hamshire.

Ke, C. and W.-X. Wang. 2001**.** Bioaccumulation of Cd, Se, and Zn in an estuarine oyster (*Crassostrea rivularis*) and oyster (*Saccostea glomerata*). **Aquatic Toxicology**. 56: 33-51.

Ke, C., K.N.Yu, P.S.K.Lam and W.-X. Wang. 2000**.** Uptake and depuration of cesium in the green mussel *Perna viridis*. **Marine Biology.** 137: 567-575.

Kolbe, E. 2007. **Radiation and Radioisopte Application**. http://lrs.web.psi.ch/educational/courses/2006_EPFL_DOCTORAL_PSI_COKSE/week10/RRA_EK_Week10_Lectures.pdf. 6 May 2008.

Lagadic, L. and T. Caquet. 1998. Invertrebrates in testing of environmental chemicals: are they alternatives? . **Environmental Health Perspect**. 106: 593-611.

Lee, B.-G., W.G.Wallace and S.N.Luona. 1998. Uptake and loss kinetics of Cd, Cr and Zn in the bivalves *Potamocorbula amuurensis* and *Macoma balthica*: effect of size and salinity. **Marine Ecology Progress Series**. 175: 177-189.

McCoy, E.W. and T.Chongpeepian. 1988. **Bivalves mollusc culture research in Thailand**. ICLARM Technical Report 19. 170.

Mikac, N. 2002**. Bioaccumulation of inorganic and organic mercury and organ lead compounds in marine organisms**. CIESM Workshop Monograph No. 19. 128.

Nolan, C.V., S.W.Fowler and J.-L.Tyssie. 1992. Cobalt speciation and bioavailability in marine organisms. **Mar. Ecol. Prog. Series**. 88: 105-116.

Olivier, F., M. Ridd and D. Klumpp. 2002. The use of transplant culture tropical oyster (*Saccostrea commercialis*) to monitor Cd levels in North Queenland coastal waters (Australia**). Marine Pollution Bulletin**. 44: 1051-1062.

Otchere, F.A., R. J. Claude and L. Holsbeek. 2003**.** Mercury in the bivalve (*Senilia*), *Perna perna* and *Crossostrea tulipa* from Ghana. **The Science of the Total Environment**. 304: 369-375.

Phillip, D.J.H. and K. Muttarasin. 1985. Trace Metals in bivalve Molluscs from Thailand. **Mar. Environ. Res**. 15: 215-234.

Randy, H.M. 2003**. Chemistry and The Aquarium**. http://www.advancedaquarist.com/issues/nov2003/chem.htm. February 28, 2008.

Read, P. 2002. **The Preliminary Selection of An Indicator Organism: Basic Pre-Requiites**. Marine Biology. http:www.lifesciences.napier.ac.uk/teaching/MB/Mbindic.html. August 18, 2005.

Reinfelder, J.R. N.S. Fisher, S.N.Luoma, J.W.Nicholas and W.-X.Wang. 1998. Trace element trophic in aquatic organisms: A critique of the kinetic model approach. **The Science of the Total Environment**. 219: 117-135.

Reinfelder, J.R., W-X. Wang, S.N.Luoma, N.S.Fisher. 1997. Assimilation efficiencies and turnover rates of trace elements in marine bivalves: a comparison of oysters, clams and mussels. **Marine Biology.** 129: 443-452.

Ritchie, A.I.M. 1987. The application of nuclear techniques of analysis to environmental problems, pp. 1-4. **In Proceeding of the 5th Australian Conference on Nuclear Techniques on Analysis**. Australian Institute of Nuclear Science and Engineering, Lucas Heights.

Ryan, T.P. 2002. Transuranic biokinetic parameters for marine invertebrates-a review**. Environmental International**. 28: 83-96.

Statsoft. 2004. **Satistica: The Small Book**. Tulsa, OK. Statsoft Inc. 166.

Simkiss, K. and M.G. Tylor. 1989. Metal fluxes across the membrane of aquatic organisms. **Rev. Aquat. Aci**. 1: 173-188.

Texas Parks and Wildlife Department. 2004**. Texas mussel Watch. Texas Parks and Wildlife**. http://www.tpwd.state.tx.us/natke/education/tracker/mussels /. January 16, 2005.

Thomann, R.V. 1981. Equilibrium model of fate of microcontaminants in diverse aquatic food chains. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science**. 38: 280-296.

Twining, J.R., J.M. Ferris and S.J. Markich. 1995. **Bioaccumulation of ^{137}Cs and ^{85}Sr by an edible Australian subtropical freshwater fish: Report to the IAEA CRP "Radionuclide transfer from air, soil and fresh water to the food chain of man in tropical and subtropical environment**". ANSTO/C428. 20.

United State Army for Environmental Research. 2004. **Environmental Sentinel Biomonitoring (ESB) Systems**. Environmental Sentinels. http:///www. usacehr.detrick.army.mil/envsen2.html. January 15, 2005.

Van Weers, A.W. 1973. Uptake and loss of ^{65}Zn and ^{60}Co by the mussel *Mytilus edulis* L., pp. 385-401. **In Proceeding of a Symposium on Radioactive Contamination of the Marine Environment**. IAEA, Vienna.

Wagner, A. and J. Boman. 2004. Biomonitoring of trace elements in Vietnamease freshwater mussels. **Spectrochemica Acta Part B**. 59: 1125-1132.

Wang, W.-X., N.S.Fisher and N.S. Luoma. 1996. Kinetic determination of trace elements bioaccumulation in the mussels *Mytilus edulis*. **Mar. Ecol. Prog. Ser**. 140: 91-113.

Wang, W.-X. and N.S.Fisher. 1997. Modeling the influence of body size on trace elements accumulation in marine mussels *Mytilus edulis*. **Mar. Ecol. Prog. Ser**. 161: 102-115.

Wang, W.-X. and R.C.H. Dei. 1999. Factor affecting trace elements uptake in the black mussel *Septifer virgatus*. **Mar. Ecol. Prog. Ser**. 186: 161-172.

Wang, W.-X. and N.S. Fisher. 1999. Assimilation efficiencies of chemical contaminatns in aquatic invertebrates: a synthesis. **Environmental Toxicology and Chemistry**. 18: 2034-2045.

Wang, W.-X., C.Ke, K.N.Yu and P.K.S.Lam. 2000. Modelling radiocesium bioaccumulation in a marine food chain. **Mar.Ecol.Prog.Ser**. 208: 41-50.

Wang, W.-X. and N.S.Fisher. 1998. Accumulation of trace elements in a marine copepod. **Limnol. Oceanogr**. 43: 273-283.

Wang, W.-X. and N.S.Fisher. 1999. Delineating metal accumulation pathways for marine invertebrates. **The Science of the Total Env**ironment. 237/238: 459-472.

Wang, W.-X. and P.S.Rainbow. 2005. Influence of metal exposure history on trace metal uptake and accumulation by marine invertebrates. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 61: 145-159.

Wang, W.-X., I. Stupakoff. C. Cagnon, N.S.Fisher. 1998. Bioavailability of inorganic and methylmercury to marine-deposited feeding polychaete. **Environ. Sci.Technol**. 32: 2564-2571.

Wanua, M., J-L.Tyssie and S.W.Fowler. 1996. Biokinetics of selected heavy metals and radionuclides in the common Mediteranean *Echnoid paracentrotus*: Seawater and food exposure. **Mar.Ecol. Prog. Ser**. 141: 83-84.

Wicker and Schultz. 1982. **Radioecology**: Nuclear Energy and the Environment. Vol.2, CRC Press, Boca Raton, FL.

Wong, W.H., J.S. Levington, B.S.Twining, N.S. Fisher, B.P .Kelaher and A.K. Alt. 2003. Assimilation of carbon from a rotifer by the mussels *Mytillus edulis* and *Perna viridis*: a potential food-web link. **Mar. Ecol. Prog. Ser**. 253: 175-182.

Woodhead, D.S. 1997. The behavior of radionuclides discharged from sellafield in UK coastal waters. **Strategies and methodologies for applied marine radioactivity studies**. Training Course Series No.7. International Atomic Energy Agency, Vienna. 337.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ขนาดและน้ำหนักของหอยแครงสำหรับการทดลอง

หอยแครง	น้ำหนัก (กรัม)	ความกว้าง (เซนติเมตร)	ความยาว (เซนติเมตร)
1	18.89	4.0	3.0
2	17.82	4.4	3.2
3	17.87	3.9	3.0
4	15.85	3.8	3.0
5	18.28	4.0	3.0
6	16.81	4.0	3.0
7	18.42	4.0	3.0
8	18.69	4.0	3.0
9	18.17	4.0	2.5
10	16.43	4.0	2.9
11	17.50	4.0	3.0
12	19.38	4.0	3.0
13	17.57	4.2	3.0
14	19.05	4.1	2.9
15	16.57	4.0	2.8
16	16.28	4.0	3.0
17	15.63	4.2	3.0
18	18.52	4.2	2.8
19	16.82	4.0	3.0
20	16.54	4.0	3.2
21	16.58	4.4	3.0
22	18.52	3.8	2.8
23	15.77	4.0	3.0
24	15.55	4.0	2.8
25	15.62	4.1	2.9
26	17.00	4.5	3.0

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

หอยแครง	น้ำหนัก (กรัม)	ความกว้าง (เซนติเมตร)	ความยาว (เซนติเมตร)
27	19.26	4.0	2.8
28	16.03	4.0	3.8
29	18.73	4.0	3.0
30	18.13	4.0	3.0
31	16.47	4.2	3.0
32	20.28	3.8	2.8
33	15.64	4.5	3.0
34	17.98	3.7	3.0
35	16.30	4.0	2.8

ตารางผนวกที่ 2 น้ำหนักเปลือก อวัยวะทั้งตัวและฮีโมลิมฟ์ของหอยแครง

(หน่วย: กรัม)

หอยแครง	น้ำหนักทั้งตัว	เปลือก	อวัยวะทั้งตัว	ฮีโมลิมฟ์	น้ำหนักแห้งของอวัยวะทั้งตัว
1	15.6	11.02	2.42	2.16	0.49
2	15.98	10.44	2.47	3.07	0.55
3	15.32	10.53	2.12	2.67	0.44
4	17.51	11.56	2.87	3.08	0.40
5	17.12	11.63	2.82	2.67	0.48
ค่าเฉลี่ย±sd	16.31±0.96	11.04±0.56	2.74±0.68	2.73±0.38	0.47±0.06

หมายเหตุ sd คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางผนวกที่ 3 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65และปรอท-203 ที่สะสมในตัวหอยแครงจากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสี เป็นระยะเวลา 26 วัน

วันที่	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)			
			โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
0	น้ำทะเล		2.3666	0.0521	1.7765	0.2311
			ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)			
	หอยแครง		โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
1	1	18.13	nd	1.74	32.90	1.70
	2	18.73	nd	1.73	31.60	1.45
	3	18.47	nd	1.80	29.70	1.21
	4	18.35	nd	1.73	nd	2.15
	5	18.21	nd	1.61	nd	1.35
2	1	19.31	14.10	3.00	60.10	11.70
	2	17.08	nd	4.09	61.20	6.07
	3	16.20	nd	3.68	64.70	5.64
	4	17.42	nd	3.38	69.40	7.44
	5	15.94	nd	3.53	68.10	2.82
3	1	16.31	19.40	5.58	85.00	11.90
	2	19.27	21.50	3.71	nd	10.83
	3	18.32	11.10	4.20	nd	5.23
	4	15.86	nd	6.74	96.80	9.11
	5	15.96	nd	5.61	90.60	6.68
4	1	18.70	nd	5.20	nd	nd
	2	19.19	nd	7.20	nd	nd
	3	16.38	nd	4.30	nd	nd
	4	15.89	nd	nd	nd	8.04
	5	18.10	nd	nd	nd	5.22
5	1	18.58	16.20	6.93	85.90	5.78

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)			
			โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
0	น้ำทะเล		2.3666	0.0521	1.7765	0.2311
			ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)			
	หอยแครง		โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
5	2	18.19	20.00	6.37	116.00	15.30
	3	17.73	nd	7.19	109.00	5.66
	4	17.41	23.70	8.28	85.00	8.37
	5	18.40	16.20	8.36	117.00	6.65
6	1	16.09	11.80	6.71	111.00	11.70
	2	18.78	21.20	9.32	96.20	17.30
	3	16.83	16.80	6.82	122.00	14.80
	4	17.06	27.00	7.42	97.70	21.90
	5	16.88	17.60	10.30	115.00	5.57
7	1	17.83	13.80	11.50	104.00	7.08
	2	18.72	16.80	9.58	117.00	18.90
	3	18.21	28.50	13.00	147.00	25.60
	4	18.62	18.40	12.10	113.00	8.29
	5	16.32	29.10	12.80	115.00	19.30
8	1	17.50	13.80	11.50	104.00	7.08
	2	18.35	16.80	9.58	117.00	18.90
	3	16.35	28.50	13.00	147.00	25.60
	4	15.93	18.40	12.10	113.00	8.29
	5	16.57	29.10	12.80	115.00	19.30
9	1	16.22	26.40	15.10	106.00	24.80
	2	19.31	31.30	12.00	97.70	34.50
	3	17.80	28.80	16.40	157.00	9.57
	4	18.35	18.90	11.20	143.00	16.60

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)			
			โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
0	น้ำทะเล		2.3666	0.0521	1.7765	0.2311
			ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)			
	หอยแครง		โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
9	5	18.41	28.30	13.10	150.00	14.20
10	1	18.52	30.50	14.40	139.00	12.80
	2	16.19	29.60	15.40	112.00	23.10
	3	16.19	25.80	15.90	120.00	22.90
	4	15.94	24.20	14.40	132.00	9.16
	5	16.30	nd	15.10	161.00	14.90
11	1	15.64	36.80	17.90	144.00	22.00
	2	15.91	36.10	16.90	136.00	21.70
	3	18.44	32.20	15.70	114.00	11.50
	4	18.17	29.50	17.40	125.00	14.50
	5	17.63	27.60	13.90	147.00	12.90
12	1	18.38	26.20	16.50	110.00	12.40
	2	16.03	21.70	16.60	129.00	15.00
	3	15.78	nd	16.20	139.00	8.67
	4	17.73	nd	16.30	165.00	6.31
	5	17.05	nd	13.90	121.00	23.50
13	1	18.44	33.60	17.50	147.00	14.10
	2	18.31	34.90	18.40	137.00	38.90
	3	18.47	25.80	17.40	189.00	15.20
	4	18.34	18.10	13.70	159.00	16.20
	5	18.22	20.10	15.30	146.00	21.90
14	1	18.08	32.00	20.50	132.00	19.60

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ตัวอย่าง	น้ำหนัก	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)			
		(g)	โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
0	น้ำทะเล		2.3666	0.0521	1.7765	0.2311
			ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)			
	หอยแครง		โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
14	2	16.04	30.90	19.10	154.00	4.44
	3	16.71	32.00	18.60	146.00	31.50
	4	17.07	35.60	17.80	142.00	27.10
	5	19.61	33.10	17.30	155.00	31.70
15	1	18.10	40.30	21.60	141.00	19.90
	2	16.36	38.60	19.10	153.00	35.60
	3	16.19	38.60	20.70	149.00	26.00
	4	16.94	nd	20.70	nd	11.10
	5	17.62	nd	18.10	nd	46.60
16	1	16.39	nd	22.90	165.00	25.70
	2	16.95	40.80	19.20	144.00	12.10
	3	18.83	33.60	18.20	148.00	26.80
	4	16.37	37.50	18.00	143.00	33.10
	5	18.18	24.00	19.50	133.00	28.30
17	1	18.10	37.10	21.70	141.00	20.00
	2	18.57	26.60	20.30	140.00	11.70
	3	18.22	29.70	16.90	146.00	23.90
	4	17.06	38.50	20.10	153.00	34.00
	5	18.71	25.60	18.50	147.00	26.40
18	1	15.88	32.90	22.80	153.00	11.50
	2	16.37	39.60	23.60	161.00	29.20
	3	18.11	43.70	22.30	145.00	20.70

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ตัวอย่าง	น้ำหนัก	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)			
		(g)	โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
0	น้ำทะเล		2.3666	0.0521	1.7765	0.2311
			ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)			
	หอยแครง		โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
18	4	18.61	32.90	20.20	169.00	11.90
	5	18.06	nd	24.00	196.00	40.40
19	1	18.62	18.50	19.30	131.00	27.40
	2	18.20	37.70	17.20	137.00	23.70
	3	17.36	40.90	20.60	165.00	36.20
	4	18.41	nd	22.90	128.00	19.10
	5	18.20	nd	21.80	nd	30.00
20	1	16.98	44.60	24.40	159.00	47.90
	2	18.60	15.80	18.60	146.00	19.20
	3	16.33	46.40	26.30	190.00	40.60
	4	17.37	25.30	19.70	159.00	35.30
	5	16.22	39.00	24.20	144.00	37.70
21	1	16.93	nd	21.50	150.00	43.90
	2	18.43	48.10	22.40	141.00	19.80
	3	18.23	29.80	18.50	139.00	24.70
	4	15.9	34.50	22.80	159.00	24.50
	5	16.51	29.80	22.20	173.00	15.80
22	1	17.74	42.20	27.40	191.00	17.10
	2	19.6	35.80	23.20	161.00	46.80
	3	16.03	41.30	29.10	176.00	33.40
	4	15.59	46.50	32.40	198.00	51.20
	5	18.62	31.60	23.50	161.00	18.30

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ (Bq/ml)			
			โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
0	น้ำทะเล		2.3666	0.0521	1.7765	0.2311
			ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)			
	หอยแครง		โครเมียม-51	โคบอลต์-57	สังกะสี-65	ปรอท-203
23	1	19.74	43.60	21.00	153.00	54.40
	2	17.76	31.00	26.00	162.00	15.50
	3	16.64	57.40	28.70	164.00	50.30
	4	18.44	51.00	23.90	143.00	22.20
	5	15.94	48.20	25.70	156.00	47.10
24	1	18.21	33.20	21.20	150.00	26.60
	2	18.53	39.80	22.80	128.00	36.40
	3	15.93	42.90	27.90	192.00	34.50
	4	16.26	28.10	28.10	176.00	19.80
	5	17.47	66.70	30.10	188.00	27.90
25	1	18.6	33.70	24.60	165.00	16.90
	2	18.62	42.60	22.10	132.00	33.20
	3	17.34	43.70	21.40	162.00	45.50
	4	18.42	49.40	24.70	138.00	25.10
	5	15.89	63.10	29.40	187.00	56.50
26	1	15.94	86.30	35.10	179.00	64.70
	2	17.54	41.00	31.80	130.00	18.90
	3	18.24	73.50	26.00	180.00	63.90
	4	18.32	56.60	29.10	150.00	29.50
	5	16.52	38.50	22.40	190.00	25.30

หมายเหตุ nd = ไม่สามารถตรวจวัดได้เมื่อขีดจำกัดล่างของการวัดโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65และปรอท-203 มีค่าเท่ากับ 28.3, 0.56, 15.5 และ 2.08 เบ็กเคอเรลต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ 4 ค่า CF ของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65และปรอท-203 จากการทดลองการรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของหอยแครงเป็นระยะเวลา 26 วัน

วันที่	CF							
	โครเมียม-51		โคบอลต์-57		สังกะสี-65		ปรอท-203	
	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd
1	-	-	33.05	1.33	17.68	0.91	6.80	1.60
2	-	-	67.87	7.67	36.44	2.31	29.14	14.04
3	6.27	1.79	83.88	49.27	51.14	3.32	30.07	16.54
4	-	-	106.85	28.49	-	-	28.69	8.63
5	8.04	1.52	142.53	16.67	57.77	8.98	36.14	17.45
6	7.98	2.38	155.74	30.89	61.04	6.29	61.68	26.50
7	9.01	2.97	226.41	26.37	67.13	9.19	68.52	34.23
8	11.05	2.15	240.69	23.73	70.62	8.79	65.51	24.59
9	11.30	1.99	260.27	41.45	73.63	15.20	86.26	42.58
10	11.63	1.27	288.68	12.48	74.79	10.65	71.71	26.90
11	13.71	1.70	314.01	30.70	75.02	7.72	71.48	21.55
12	10.12	1.34	305.18	21.67	74.79	11.78	57.01	28.86
13	11.20	3.22	315.93	36.79	87.63	11.40	91.99	44.61
14	13.83	0.76	358.16	23.84	82.11	5.32	98.95	49.37
15	16.55	0.41	384.64	27.06	83.16	3.44	120.47	59.60
16	14.36	3.07	375.43	37.87	82.56	6.58	100.48	35.12
17	13.31	2.52	374.28	35.39	81.89	2.94	100.39	35.54
18	15.75	2.25	433.40	28.55	92.81	11.04	98.40	53.07
19	13.68	5.12	390.79	42.59	78.99	9.53	130.59	44.01
20	14.46	5.58	434.55	63.58	89.89	10.36	156.38	45.81
21	15.02	3.66	412.28	33.23	85.83	7.88	111.38	46.73
22	16.68	2.46	520.54	74.55	99.91	9.55	144.35	68.08
23	19.54	4.17	481.00	54.60	87.63	4.69	164.00	76.77
24	17.81	6.29	499.42	73.16	93.94	15.31	125.66	28.75

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

วันที่	CF							
	โครเมียม-51		โคบอลต์-57		สังกะสี-65		ปรอท-203	
	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd
25	19.65	4.58	469.10	60.25	88.31	12.51	153.35	68.43
26	22.28	6.36	554.32	94.79	93.38	14.06	166.02	77.01

หมายเหตุ sd คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(-) ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากค่ากัมมันตภาพจำเพาะต่ำกว่าค่าขีดจำกัดล่างของการวัด

ตารางผนวกที่ 5 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 (Bq/g) ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงจากการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 59 วัน

วันที่	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)																			
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ตัวอย่างที่ 4				ตัวอย่างที่ 5			
	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg
0	62.80	24.10	180.00	51.70	36.60	29.70	164.00	17.20	57.00	33.20	191.00	56.20	57.00	33.20	191.00	56.20	47.20	30.40	182.00	25.40
1	58.00	24.00	184.00	50.90	36.00	29.80	153.00	16.50	50.00	31.40	170.00	39.20	50.00	34.20	187.00	44.30	47.00	29.90	170.00	24.90
2	53.20	23.10	174.00	51.10	35.50	29.30	158.00	17.60	56.20	32.00	198.00	57.40	46.00	32.10	182.00	40.00	42.00	30.90	177.00	25.60
3	45.00	22.50	141.00	45.00	35.00	28.00	143.00	15.10	50.00	30.00	165.00	52.00	35.00	30.00	159.00	50.00	35.00	28.00	175.00	21.10
4	42.80	21.20	130.00	43.40	36.00	28.30	129.00	14.00	54.80	28.00	138.00	48.90	36.30	28.40	140.00	36.90	34.40	27.00	128.00	20.10
5	47.20	20.50	121.00	43.20	34.60	27.40	88.40	14.20	49.00	27.00	102.00	45.30	34.90	26.80	113.00	31.90	32.00	27.50	111.00	24.00
6	37.70	20.00	129.00	40.20	33.00	24.30	111.00	14.00	43.80	28.00	102.00	31.80	42.90	24.50	119.00	42.50	34.20	26.00	73.10	19.50
7	38.80	19.60	98.00	43.60	30.00	25.90	81.60	14.00	31.00	29.10	101.00	37.90	51.10	28.20	101.00	51.20	30.00	25.20	77.50	21.50
8	35.00	20.90	107.00	44.20	26.20	23.50	64.50	14.60	40.70	28.60	90.90	39.50	37.40	26.90	94.40	48.70	28.00	24.60	95.90	23.10
9	32.00	19.70	99.80	41.30	29.00	22.60	47.50	14.40	34.20	26.90	99.40	34.60	39.20	26.50	101.00	49.80	34.70	25.80	80.10	20.20
10	36.60	18.40	101.00	40.40	26.70	21.60	69.90	12.80	25.20	28.70	97.10	35.10	42.40	24.70	78.50	42.30	26.50	26.20	80.00	20.70
11	32.60	18.80	92.30	38.00	21.60	22.70	58.30	12.10	23.00	26.50	94.10	35.70	33.50	24.80	86.20	51.00	30.00	25.40	74.30	20.70
12	33.20	17.50	85.50	38.00	31.50	21.60	54.10	13.30	21.00	25.90	89.80	32.40	31.00	24.80	74.10	46.50	32.00	26.10	68.20	19.70
13	29.90	17.00	80.90	37.40	28.30	24.00	71.80	14.80	21.80	25.10	66.30	31.20	24.20	23.20	63.80	46.10	35.00	25.20	62.90	21.00
14	33.00	16.70	88.70	37.10	18.20	22.30	63.20	12.00	19.40	23.70	73.50	30.80	44.90	22.90	73.30	42.90	22.20	23.10	66.20	20.10

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

วันที่	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)																			
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ตัวอย่างที่ 4				ตัวอย่างที่ 5			
	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg
0	62.80	24.10	180.00	51.70	36.60	29.70	164.00	17.20	57.00	33.20	191.00	56.20	57.00	33.20	191.00	56.20	47.20	30.40	182.00	25.40
15	25.00	17.30	76.90	39.00	18.00	20.20	49.10	12.00	19.00	23.40	78.00	31.60	33.80	21.70	67.80	44.80	20.10	24.20	54.40	20.60
16	33.00	15.20	68.80	35.80	19.00	21.00	51.50	14.10	20.00	25.10	77.90	29.90	24.60	21.20	68.80	39.50	18.20	21.90	54.50	19.80
17	30.00	16.60	66.10	40.30	22.00	18.30	39.70	12.70	24.00	22.80	49.30	31.50	32.20	21.40	56.60	43.90	19.10	23.10	59.20	21.20
18	27.00	15.00	54.50	35.60	23.00	19.70	42.90	12.10	22.00	23.80	65.30	29.80	34.00	20.80	62.50	41.50	26.10	22.20	60.50	24.70
19	23.00	15.60	55.30	34.40	20.90	19.40	38.60	12.60	18.00	23.10	67.60	28.50	36.00	22.80	74.90	42.00	23.00	19.80	50.40	18.20
20	22.00	16.20	49.30	36.80	27.00	19.60	16.90	13.20	17.00	22.70	56.40	29.40	36.50	20.50	46.40	41.50	21.00	22.30	51.10	20.00
21	21.00	11.10	38.00	27.80	29.00	18.30	44.20	9.99	40.00	21.90	55.60	27.00	34.00	20.00	37.20	30.30	32.00	21.00	41.80	15.30
22	22.00	15.00	57.80	33.50	28.00	19.60	51.60	11.80	29.00	22.20	55.30	30.60	31.00	20.50	48.70	40.40	29.00	22.60	49.90	17.40
23	19.00	15.90	53.10	35.60	28.00	20.10	41.20	11.20	28.00	23.20	37.70	27.80	33.60	21.20	17.00	39.40	28.00	20.10	56.10	18.40
24	21.30	15.30	47.90	32.70	28.00	18.90	37.40	10.90	28.00	22.00	51.80	29.00	29.30	21.80	47.60	39.40	28.00	22.10	48.40	18.70
25	nd	15.40	51.50	32.30	nd	19.90	36.10	10.60	nd	21.30	39.60	29.30	nd	21.30	18.80	37.10	nd	21.20	42.40	17.30
26	nd	13.30	32.70	30.20	nd	19.90	30.00	12.10	nd	20.90	39.60	30.00	nd	19.50	36.40	35.20	nd	21.30	39.80	17.10
27	nd	14.80	41.60	27.40	nd	19.20	26.60	10.10	nd	19.50	42.40	25.40	nd	20.50	37.70	39.10	nd	19.50	54.60	18.00
28	nd	14.10	34.90	32.50	nd	17.30	29.70	11.80	nd	20.50	33.20	26.40	nd	20.30	43.10	33.40	nd	20.50	55.30	16.00
29	nd	14.10	36.90	30.20	nd	19.00	30.00	9.21	nd	20.00	36.40	26.00	nd	20.30	21.90	35.40	nd	20.00	58.10	15.00

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

วันที่	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)																			
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ตัวอย่างที่ 4				ตัวอย่างที่ 5			
	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg
0	62.80	24.10	180.00	51.70	36.60	29.70	164.00	17.20	57.00	33.20	191.00	56.20	57.00	33.20	191.00	56.20	47.20	30.40	182.00	25.40
30	nd	14.00	34.30	31.40	nd	17.30	26.30	10.50	nd	22.70	40.70	28.80	nd	20.10	29.60	34.90	nd	22.70	50.50	17.00
31	nd	13.20	40.40	30.10	nd	17.00	26.10	9.29	nd	19.70	39.00	24.50	nd	19.80	40.20	35.60	nd	19.70	53.30	16.00
32	nd	13.90	45.20	28.10	nd	18.50	33.70	11.30	nd	21.40	38.70	26.30	nd	20.60	36.50	37.00	nd	21.40	50.40	14.00
33	nd	13.60	31.70	29.80	nd	18.10	34.30	9.66	nd	19.60	10.60	22.50	nd	18.70	30.80	36.40	nd	19.60	54.80	18.00
34	nd	12.80	38.90	29.10	nd	19.30	25.50	12.80	nd	21.40	35.00	23.70	nd	21.00	17.20	36.30	nd	21.40	48.60	19.00
35	nd	13.30	31.70	30.60	nd	18.30	31.30	9.43	nd	21.80	40.30	25.70	nd	19.90	45.10	36.20	nd	21.80	52.50	17.00
36	nd	13.40	37.90	28.30	nd	18.30	38.00	9.99	nd	20.20	39.30	25.40	nd	18.50	30.30	36.40	nd	20.20	48.20	16.00
37	nd	13.40	32.70	27.00	nd	17.70	30.70	11.30	nd	22.60	37.00	26.60	nd	18.90	34.30	35.30	nd	22.60	48.60	19.00
38	nd	13.30	43.20	29.80	nd	17.30	29.30	10.50	nd	18.60	36.00	24.70	nd	19.30	33.00	33.40	nd	18.60	17.10	15.00
39	nd	13.80	40.10	28.40	nd	17.60	29.00	8.99	nd	20.20	38.00	26.70	nd	19.10	31.30	32.20	nd	18.00	52.50	15.00
40	nd	9.92	41.00	21.90	nd	17.20	27.80	9.79	nd	20.00	40.30	23.50	nd	-	-	-	nd	18.50	41.10	17.00
41	nd	12.40	44.20	25.90	nd	17.70	31.70	9.84	nd	21.10	39.00	23.70	nd	-	-	-	nd	18.00	39.60	15.00
42	nd	11.90	30.80	23.90	nd	16.30	29.00	9.28	nd	20.70	38.90	23.60	nd	-	-	-	nd	17.00	41.40	19.00
43	nd	15.20	35.20	28.70	nd	18.50	26.00	9.73	nd	19.80	36.30	23.30	nd	-	-	-	nd	16.00	43.20	15.00
44	nd	13.30	39.70	27.10	nd	16.70	27.00	9.03	nd	19.10	35.00	21.90	nd	-	-	-	nd	17.00	42.10	14.00

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

วันที่	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)																			
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ตัวอย่างที่ 4				ตัวอย่างที่ 5			
	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg
0	62.80	24.10	180.00	51.70	36.60	29.70	164.00	17.20	57.00	33.20	191.00	56.20	57.00	33.20	191.00	56.20	47.20	30.40	182.00	25.40
45	nd	13.60	35.00	29.00	nd	19.20	26.00	10.90	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	16.00	35.00	19.00
46	nd	13.30	32.00	25.30	nd	17.60	29.70	8.62	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	15.00	46.00	15.00
47	nd	13.30	36.00	25.30	nd	17.60	29.70	8.62	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	18.00	46.00	16.00
48	nd	12.70	42.20	25.70	nd	18.20	24.40	8.93	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	17.00	45.50	14.00
49	nd	14.50	32.20	28.20	nd	17.20	21.00	7.86	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	19.00	32.50	16.00
50	nd	11.70	30.30	27.80	nd	16.60	23.00	7.96	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	16.00	40.90	16.00
51	nd	12.60	38.50	26.30	nd	17.10	27.00	9.38	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	15.00	44.00	18.00
52	nd	13.30	41.60	27.00	nd	17.10	28.30	9.02	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	14.00	47.70	15.00
53	nd	13.30	41.60	27.00	nd	17.10	28.30	9.02	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	14.00	47.40	19.00
54	nd	11.70	27.60	25.30	nd	17.50	25.00	10.60	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	13.00	50.60	15.00
55	nd	13.00	37.70	23.10	nd	15.10	29.60	9.81	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	15.00	49.10	14.00
56	nd	11.50	34.00	27.00	nd	15.40	26.00	9.11	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	16.00	41.50	17.00
57	nd	12.40	29.50	27.30	nd	14.90	21.00	9.83	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	15.00	37.00	18.00

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

วันที่	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/g)																			
	ตัวอย่างที่ 1				ตัวอย่างที่ 2				ตัวอย่างที่ 3				ตัวอย่างที่ 4				ตัวอย่างที่ 5			
	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg	^{51}Cr	^{57}Co	^{65}Zn	^{203}Hg
0	62.80	24.10	180.00	51.70	36.60	29.70	164.00	17.20	57.00	33.20	191.00	56.20	57.00	33.20	191.00	56.20	47.20	30.40	182.00	25.40
58	nd	11.60	38.78	29.90	nd	15.10	23.00	7.93	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	14.00	35.00	17.00
59	nd	12.10	30.00	23.00	nd	15.30	25.00	9.18	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	14.00	32.80	18.00

หมายเหตุ nd = ไม่สามารถตรวจวัดได้เมื่อโครเมียม-51มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดล่างของการวัด (28.3 เบ็กเคอเรลต่อกรัม)

(-) สัตว์ทดลองตาย

ตารางผนวกที่ 6 ร้อยละของโครเมียม-51 โคบอลต์-57 สังกะสี-65 และปรอท-203 ที่เหลือสะสมในตัวหอยแครงจากการทดลองการขับนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นระยะเวลา 59 วัน

วันที่	ร้อยละ							
	โครเมียม-51		โคบอลต์-57		สังกะสี-65		ปรอท-203	
	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd
0	100	-	100	-	100	-	100	-
1	92.99	5.44	99.17	3.08	95.17	5.05	88.20	13.13
2	90.01	7.70	97.84	2.37	97.84	3.33	95.05	13.42
3	87.23	10.24	92.09	1.76	86.26	6.53	87.88	3.41
4	75.21	14.45	88.39	4.26	73.35	3.15	79.43	8.24
5	76.97	16.73	85.97	5.23	58.94	5.68	79.59	13.86
6	71.15	7.63	81.69	4.63	59.04	12.58	73.63	9.77
7	68.61	18.60	84.80	2.72	50.51	4.75	81.78	8.77
8	69.53	3.40	82.79	3.42	49.70	7.35	83.65	7.84
9	67.43	6.86	80.71	3.18	46.67	10.78	78.66	10.24
10	61.19	12.60	79.22	6.60	46.93	6.34	74.36	7.21
11	56.57	4.03	78.50	3.40	44.41	6.38	75.92	10.51
12	55.64	9.35	76.78	5.52	40.75	6.32	73.76	9.58
13	50.41	11.63	75.94	5.88	38.28	5.59	75.72	12.39
14	52.42	16.35	72.15	3.25	40.21	5.15	70.36	9.45
15	47.23	10.54	71.05	5.38	35.78	5.97	72.45	10.09
16	44.19	7.82	69.05	5.42	35.28	4.56	70.53	11.05
17	45.94	7.29	67.92	5.44	29.78	5.06	73.88	10.54
18	47.56	6.73	67.19	5.00	31.32	3.23	76.60	15.90
19	46.67	9.77	66.69	2.26	31.31	6.18	67.38	9.82
20	39.94	4.13	67.34	4.19	23.92	7.85	70.56	10.60
21	36.00	5.20	60.59	8.85	23.92	4.02	54.81	4.69
22	37.00	4.36	66.24	5.06	29.09	2.76	65.65	6.74

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

วันที่	ร้อยละ							
	โครเมียม-51		โคบอลต์-57[1]		สังกะสี-65[2]		ปรอท-203	
	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd
23	39.65	8.05	66.70	2.24	22.82	8.91	65.20	9.18
24	37.66	5.29	66.35	3.75	25.61	1.77	64.39	8.42
25	-	-	65.79	2.55	20.90	6.87	62.07	6.15
26	-	-	62.79	6.02	19.62	1.62	62.42	6.80
27	-	-	62.14	2.38	22.25	5.09	59.47	10.93
28	-	-	61.42	3.70	21.34	5.45	60.17	8.08
29	-	-	61.93	2.93	20.25	7.39	56.05	6.42
30	-	-	63.99	7.30	19.93	4.96	60.41	5.70
31	-	-	59.16	3.71	21.82	4.84	56.43	8.13
32	-	-	63.37	4.63	22.54	3.68	57.56	8.17
33	-	-	59.44	3.41	18.06	8.86	57.89	11.59
34	-	-	63.24	6.29	18.24	6.62	62.45	13.69
35	-	-	62.82	6.23	22.05	4.42	58.22	8.41
36	-	-	60.05	4.54	21.43	3.89	57.16	7.77
37	-	-	62.91	8.02	20.18	3.69	60.57	10.94
38	-	-	57.76	2.33	17.48	5.24	56.22	6.97
39	-	-	58.82	1.46	21.02	4.92	54.21	4.53
40	-	-	55.04	9.34	20.85	2.71	52.01	12.16
41	-	-	58.45	5.06	21.52	2.26	52.13	7.68
42	-	-	55.63	5.32	19.48	2.60	54.24	14.57
43	-	-	59.41	4.75	19.54	3.24	53.15	7.93
44	-	-	56.22	0.98	19.99	3.13	49.75	7.30
45	-	-	57.90	6.14	18.18	2.01	64.76	9.43
46	-	-	54.60	4.98	20.39	4.24	52.70	5.53
47	-	-	57.89	2.34	21.13	3.71	54.01	7.80

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

วันที่	ร้อยละ							
	โครเมียม-51		โคบอลต์-57		สังกะสี-65		ปรอท-203	
	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd	ค่าเฉลี่ย	sd
48	-	-	56.63	4.34	21.11	5.45	52.25	2.72
49	-	-	60.19	2.29	16.18	2.93	54.41	8.65
50	-	-	52.36	3.68	17.78	4.30	44.66	7.93
51	-	-	53.07	4.17	20.68	3.91	58.76	10.65
52	-	-	52.94	6.08	22.19	4.55	54.57	3.88
53	-	-	52.94	6.08	22.14	4.47	59.82	12.97
54	-	-	50.08	8.19	19.46	7.22	56.54	6.71
55	-	-	51.38	2.35	21.99	4.56	52.28	6.65
56	-	-	50.73	2.64	19.18	3.48	57.37	8.28
57	-	-	50.32	1.06	16.51	3.76	60.27	9.43
58	-	-	48.34	2.40	18.27	3.85	56.96	10.44
59	-	-	49.26	2.85	16.64	1.39	56.24	13.42

หมายเหตุ (-) ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากค่ากัมมันตภาพรังสีต่ำกว่าค่าขีดจำกัดล่างของการวัด

sd คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

[1] ค่าเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง ตั้งแต่วันที่ 45-59

[2] ค่าเฉลี่ย 4 ตัวอย่าง ตั้งแต่วันที่ 40-44

ตารางผนวกที่ 7 สูตรอาหารสารละลายเอฟของกิลลาร์ด (Guillard F medium) ที่ระดับความเข้มข้น F/2

สารอาหาร	น้ำหนัก
$NaNo_3$	42.074 g
$NaH_2PO_4.H_2O$	3 g
$Na_2SiO_3.9H_2O$	16.50 g
Thiamin-HCl (Vit B1)	0.2 g
Biotin (Vit H)	0.05 mg
Cyanocobalamine (Vit B12)	0.001 mg
$FeCl_3.6H_2O$	1.45 mg
$MnCl_2.4H_2O$	36.0 g
$Na_2MoO_4.2H_2O$	1.26 g
$ZnSO_4.7H_2O$	4.40 g
NaEDTA	5.0 mg
CuSO4.5H2O	1.96 g

หมายเหตุ 1. เตรียมสารละลายอาหารแต่ละชนิดให้มีปริมาตร 1 ลิตรโดยใช้ขวดบรรจุที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อและใช้น้ำทะเลที่ผ่านการกรองด้วยแท่งกรองแบบคอลัมน์ขนาด 0.22 μm

2. ใช้สารละลายแต่ละชนิด 1 มิลลิลิตรต่อน้ำทะเล 1 ลิตร ในการเพาะขยายแพลงก์ตอน

ที่มา: ลัดดา (2543)

ตารางผนวกที่ 8 ปริมาณโลหะหนักในอวัยวะทั้งตัวของหอยแครง *A. granosa*

Elements	Average Body Weight (g)				
	0.53	1.12	1.58	2.21	4.75
Mg	4612	5418	4892	4282	5770
Cl	55912	51219	53409	49230	51470
Mn	10.8	18.0	10.7	12.7	11.0
K	1.02	4.7	1.00	1.10	9.91
As	18.7	18.0	20.2	19.2	18.8
Se	5.1	4.7	4.5	4.2	3.7
Br	21.5	211	223	187	209
Zn	236	2.7	206	192	185
Co	0.36	0.31	0.31	0.32	0.27
Fe	1770	1426	1946	1650	2075
Rb	7.2	5.6	6.7	6.0	5.8
Cr	4.2	3.7	4.7	2.5	2.8

ที่มา: Ibrahim (1995)

ตารางผนวกที่ 9 ค่าคงที่อัตราการรับโลหะหนักของหอยสายพันธุ์ต่างๆ

โลหะหนัก	สัตว์ทดลอง	k_u ($l.g^{-1}.d^{-1}$)	เอกสารอ้างอิง
Cr	*P. viridis*	0.039	Chong and Wang (2001)
	R. philipinarum	0.028	Chong and Wang (2001)
	S. virgatus	0.085	Wang and Dei (1999)
	M. edulis	0.100	Wang and Fisher (1996)
	A .granosa	0.068	การศึกษานี้
	M. balthica	0.006	Lee *et al*. (1998)
	P. amurensis	0.028	Lee *et al*. (1998)
Zn	*P .viridis*	0.637	Chong and Wang (2001)
	R .philipinarum	0.234	Chong and Wang (2001)
	A .granosa	0.210	การศึกษานี้
	S. virgatus	0.460	Wang and Dei (1999)
	M. edulis	1.044	Wang and Fisher (1996)
	M. balthica	0.091	Lee *et al*. (1998)
	P. amurensis	0.425	Lee *et al*. (1998)
Co	*M. edulis*	0.124	Wang and Fisher (1997)
	T. logicornis	0.606	Wang *et al.* (1998)
	N. succinea	0.016	Wang and Fisher (1998)
	A .granosa	0.0468	การศึกษานี้
Hg	*N. succinea*	1.26 Hg (II)	Wang and Fisher (1998)
	N. succinea	2.37 CH_3Hg (II)	Wang and Fisher (1998)

ตารางผนวกที่ 10 ค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพการขับโลหะหนักของหอยสายพันธุ์ต่างๆ

โลหะหนัก	$Tb_{1/2}(d)$	สัตว์ทดลอง	เอกสารอ้างอิง
Co	47-52	*M. edulis*	Wang *et al.* (1996)
	55-65	*M. galloprovincialis*	Fisher *et al.* (1996)
	55-72	*M. edulis*	Van Weers (1973)
	124.6	*A. granosa*	การศึกษานี้
Zn	48-60	*M. edulis*	Van Weers (1973)
	44-66	*M. edulis*	Wang *et al.* (1996)
	41-52	*M. galloprovincialis*	Fisher *et al.* (1996)
	118.6	*A. granosa*	การศึกษานี้

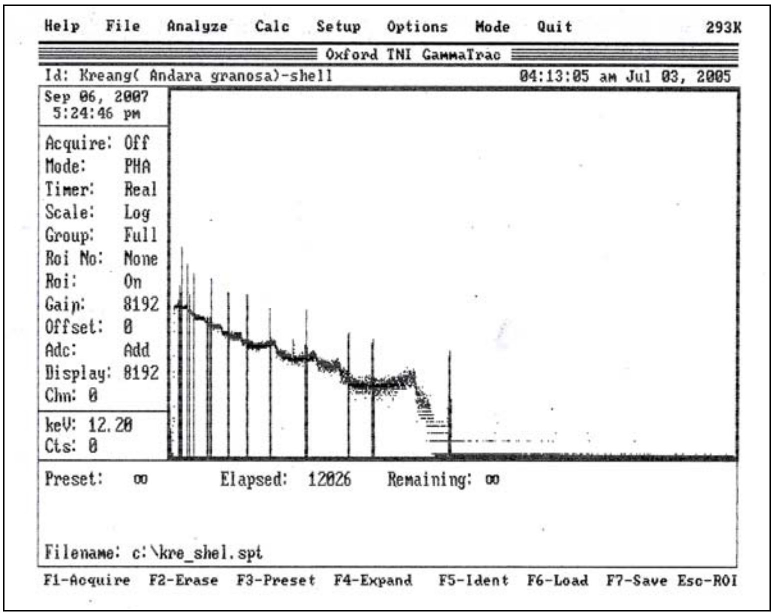
ตารางผนวกที่ 11 การเปรียบเทียบค่า CF ของอวัยวะทั้งตัว เปลือกและฮีโมลิมฟ์

นิวไคลด์กัมมันตรังสี	CF^1	CF^2		
		เปลือก	อวัยวะทั้งตัว	ฮีโมลิมฟ์
โครเมียม-51	$5x10^2$	30.9±6.4	52.2±9.4	-
โคบอลต์-57	$1x10^3$	1032.2±77.0	84.3±35.1	85.4±42.2
สังกะสี-65	$1x10^5$	154.9±36.3	185.1±33.9	1.3±0.2
ปรอท-203	$2x10^3$	41.6±9.0	1329.4±196.4	20.7±5.5

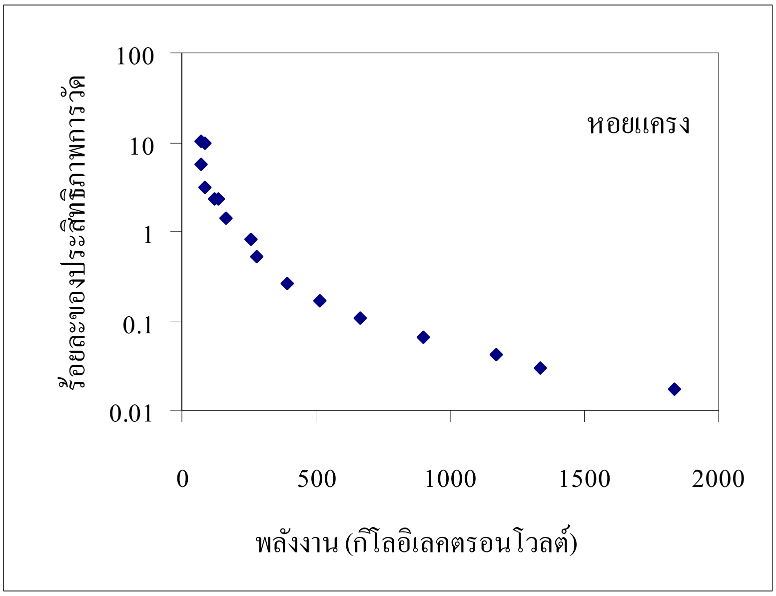
หมายเหตุ CF^1 จากเอกสาร IAEA Technical Report No.422

CF^2 ที่ได้จากการทดลอง

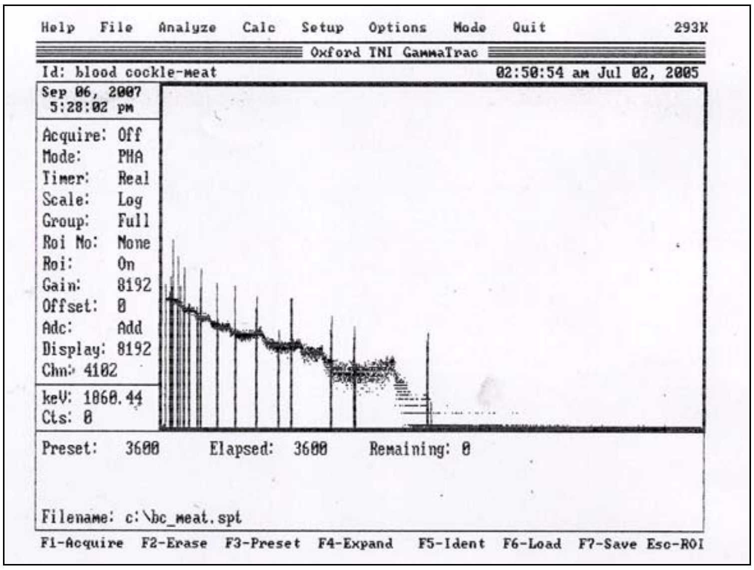
ที่มา: IAEA (2004)



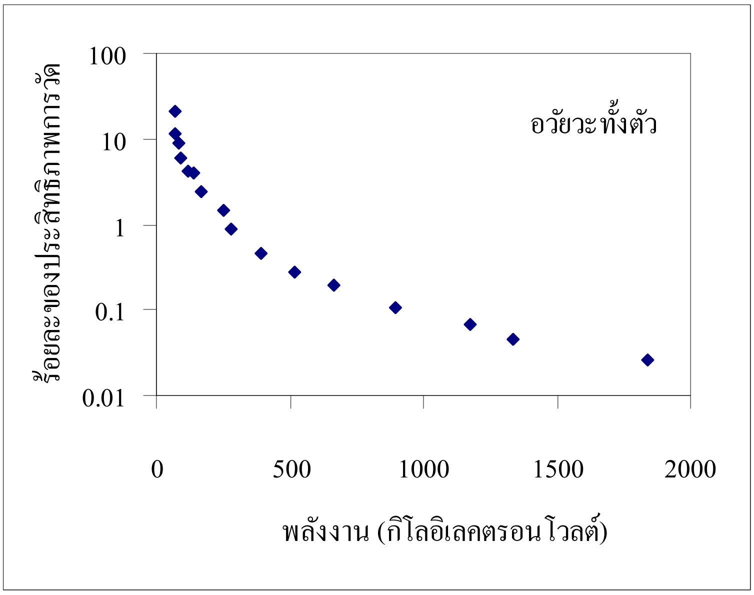
ภาพผนวกที่ 1 สเปคตรัมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมในหอยแครงกัมมันตรังสีมาตรฐาน



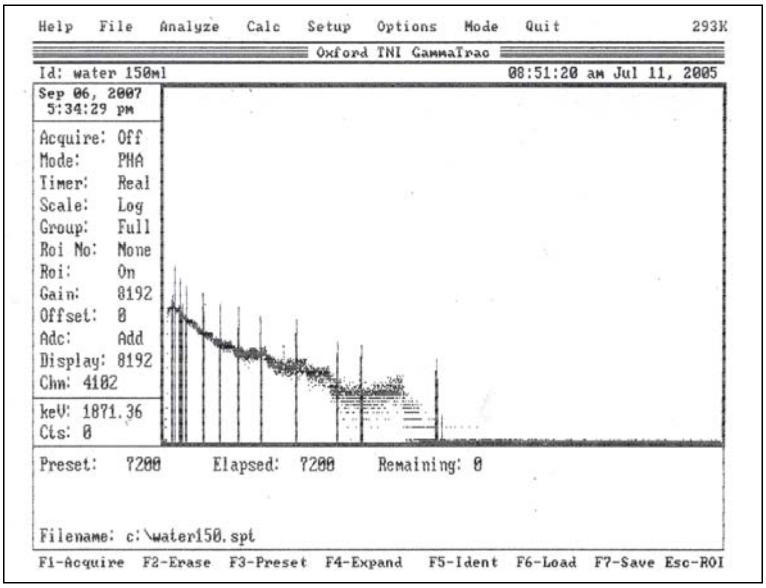
ภาพผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับร้อยละของประสิทธิภาพการวัดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากหอยแครง



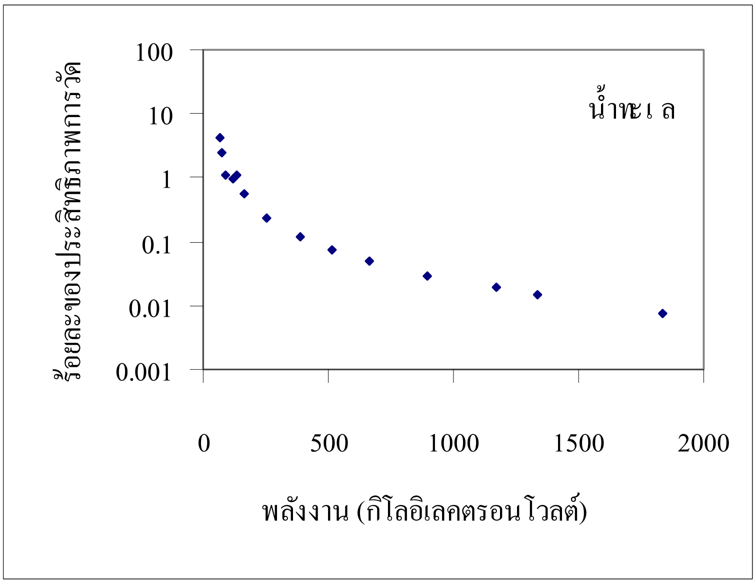
ภาพผนวกที่ 3 สเปคตรัมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมจากตัวอย่าง อวัยวะทั้งตัวกัมมันตรังสีมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับร้อยละของประสิทธิภาพการวัดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากอวัยวะทั้งตัว



ภาพผนวกที่ 5 สเปคตรัมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของน้ำทะเล กัมมันตรังสีมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับร้อยละของประสิทธิภาพการวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐานรวมของน้ำทะเล

Amersham plc
The Grove Centre

Certificate of calibration of mixed radionuclide gamma-ray reference solution

RM 15034

UKAS CALIBRATION 0146

ISSUED BY: **Amersham plc**
Radiation & Radioactivity Calibration Laboratory
The Grove Centre
White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire
HP7 9LL

ISSUED FOR: **AEA Technology QSA GmbH**
Isotrak
Gieselweg 1
D-38110 Braunschweig
Germany

Description Product code: QCY44 Solution number: R5/19/7

This mixed radionuclide gamma-ray reference standard consists of a solution in 4M HCl of the nine radionuclides listed below.

Measurement and accuracy Reference time: **1200 GMT on 1 June 2005**

Mass of solution: 5.3495 grams

Parent radionuclide	Gamma-ray energy (keV)	Gamma-rays per second per gram	Combined Type A uncertainty	Combined Type B uncertainty	Expanded uncertainty	Calibration start date	Calibration finish date
Cadmium-109	88.03	645	± 0.1 %	± 3.1 %	± 6.2 %	08/11/2004	11/11/2004
Cobalt-57	122.1	579	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	09/12/2004	09/12/2004
Cerium-139	165.9	674	± 0.1 %	± 0.7 %	± 1.4 %	07/10/2004	08/10/2004
Mercury-203	279.2	1977	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	03/02/2005	03/02/2005
Tin-113	391.7	2062	± 0.1 %	± 2.0 %	± 4.0 %	23/11/2004	23/11/2004
Strontium-85	514.0	3907	± 0.1 %	± 1.3 %	± 2.6 %	13/01/2005	20/01/2005
Caesium-137	661.6	2462	± 0.1 %	± 1.0 %	± 1.9 %	06/01/2003	07/01/2003
Yttrium-88	898.0	6232	± 0.2 %	± 0.8 %	± 1.6 %	19/10/2004	21/10/2004
Cobalt-60	1173	3318	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	16/12/2004	17/12/2004
Cobalt-60	1333	3320	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	16/12/2004	17/12/2004
Yttrium-88	1836	6587	± 0.2 %	± 0.7 %	± 1.4 %	19/10/2004	21/10/2004

The calibration date is provided for added information only, and must not be confused with the reference date. It is the reference date that must be used in all calculations relating to the values of activity.

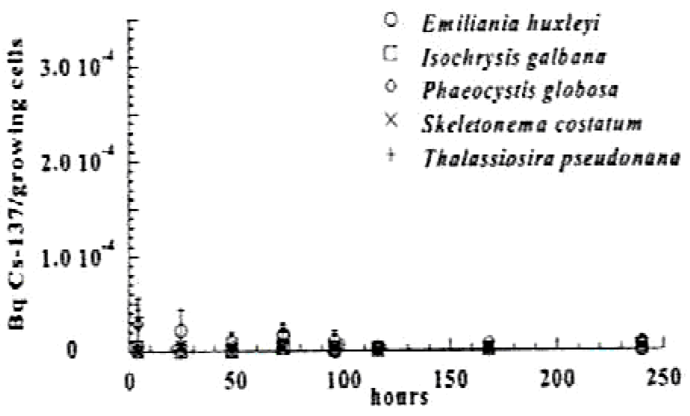
Approved Signatory **Date of issue** 11th May 2005

Amersham

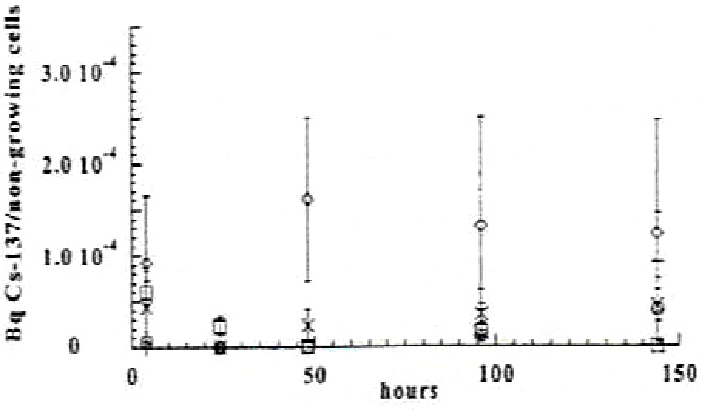
B D D Singleton Page 1 of 2 pages

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

ภาพผนวกที่ 7 ใบรับรองค่ากัมมันตภาพของสารละลายกัมมันตรังสีรวมมาตรฐาน



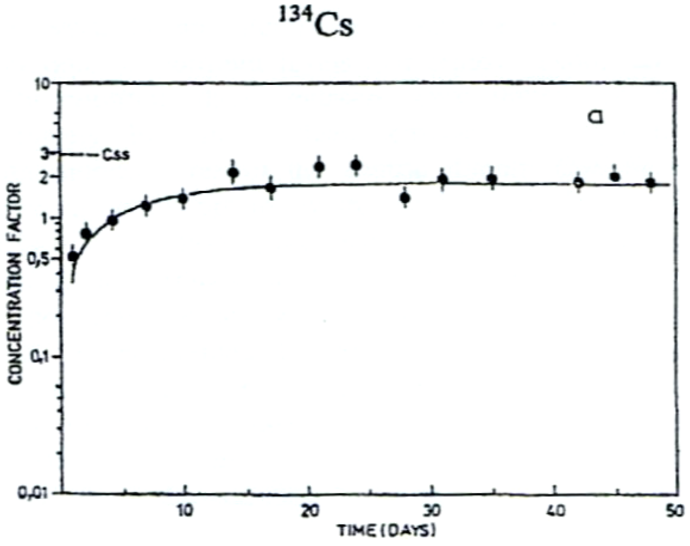
ก



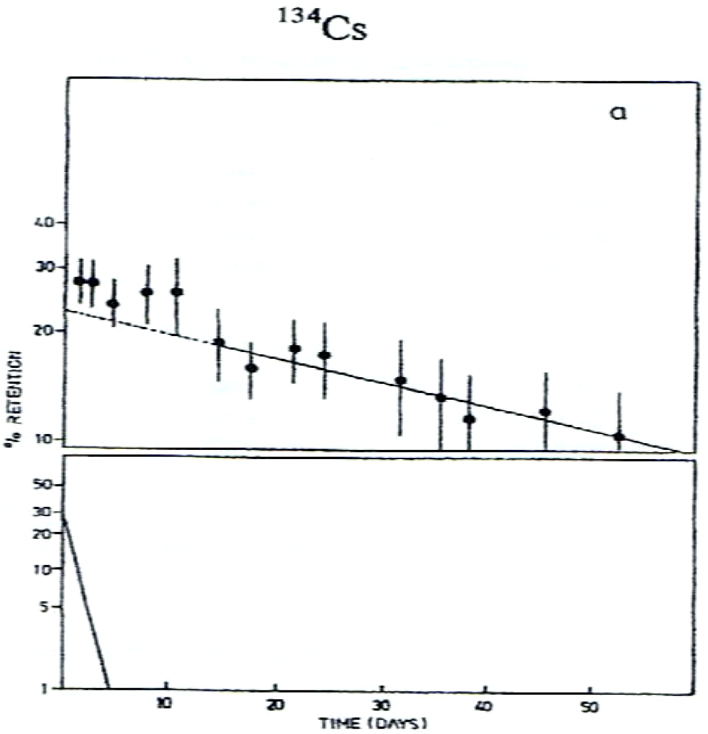
ข

ภาพผนวกที่ 8 การสะสมซีเซียม-137 ในแพลงก์ตอน 5 สายพันธุ์

ที่มา: Heldal *et al*., 2001



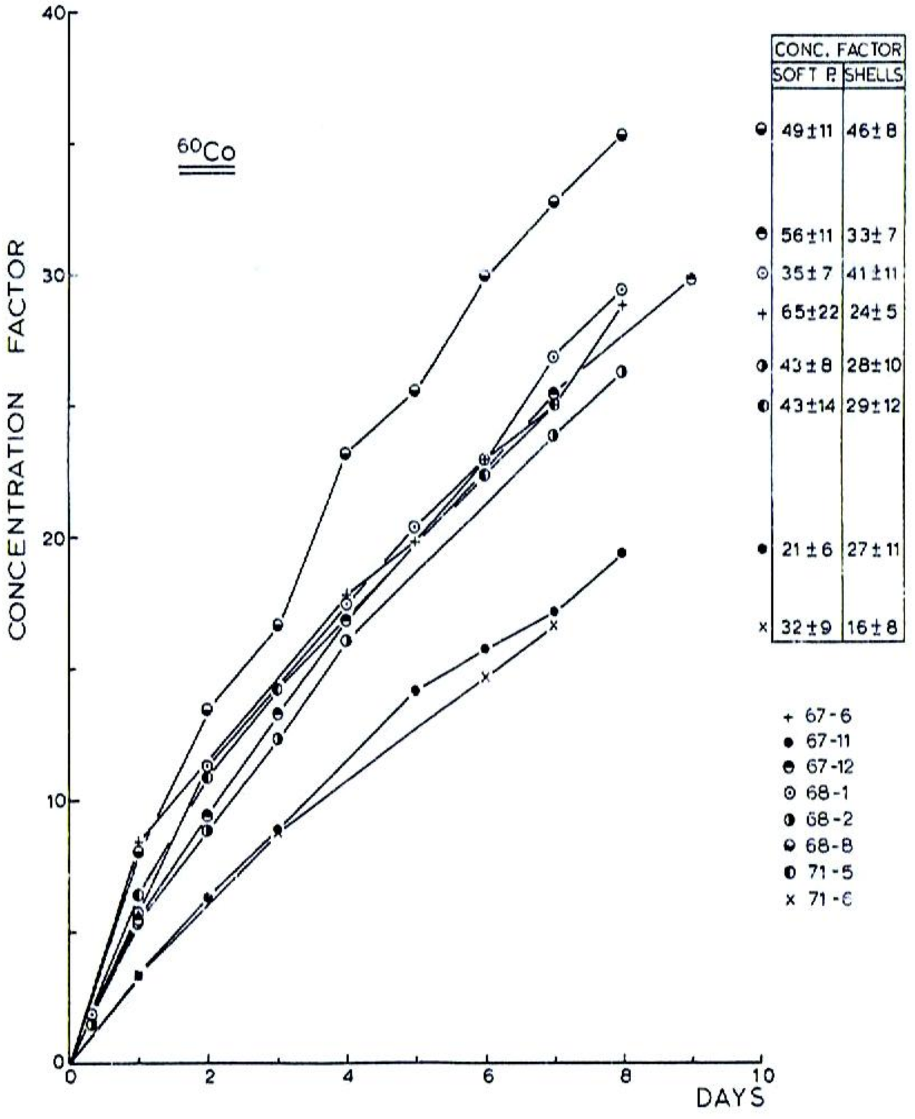
ก



ข

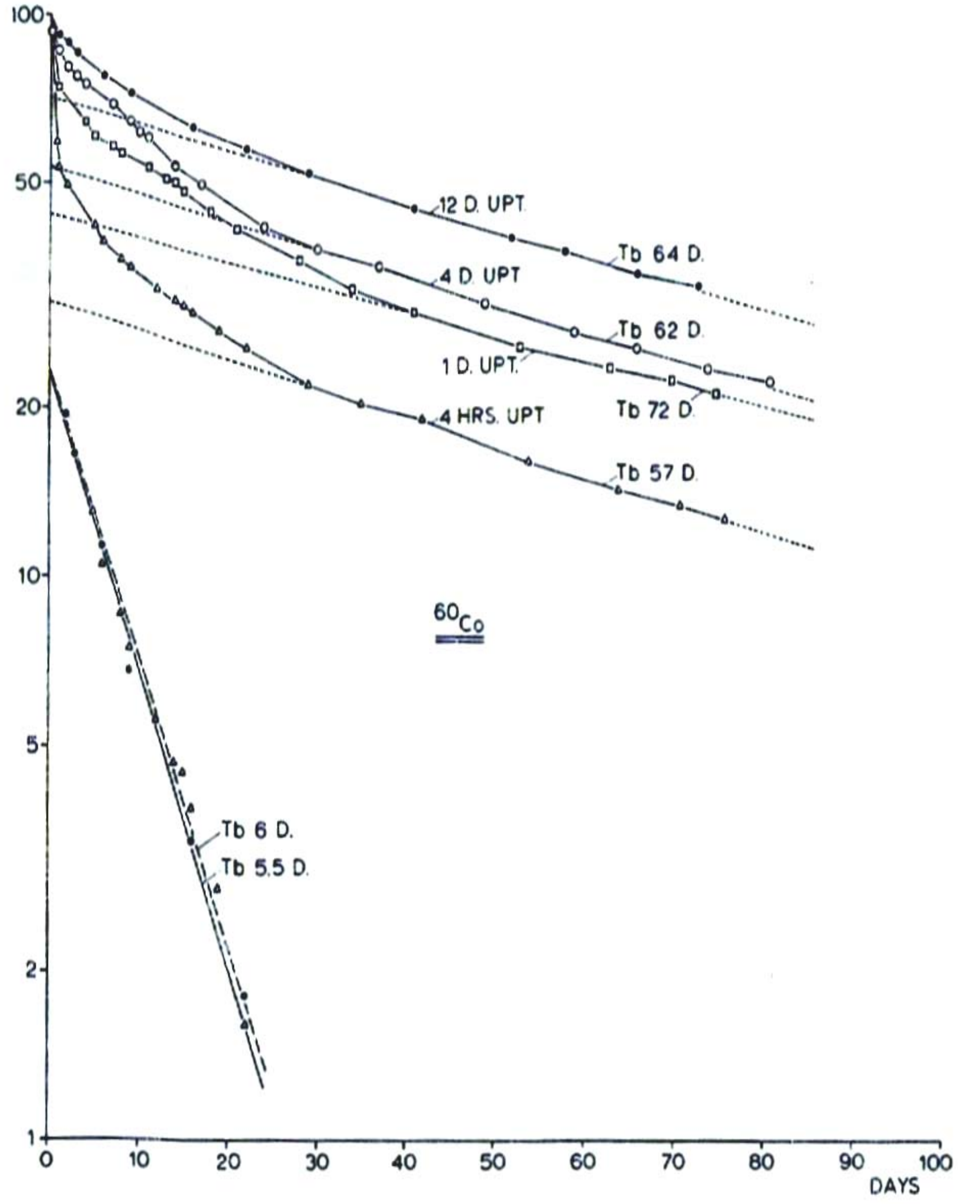
ภาพผนวกที่ 9 การสะสม (ก) และการขับ (ข) ซีเซียม-137 ของหอยแมงลงภู่ *M. galloprovincialis* ในน้ำทะเล

ที่มา: Gungor *et al.* (2001)



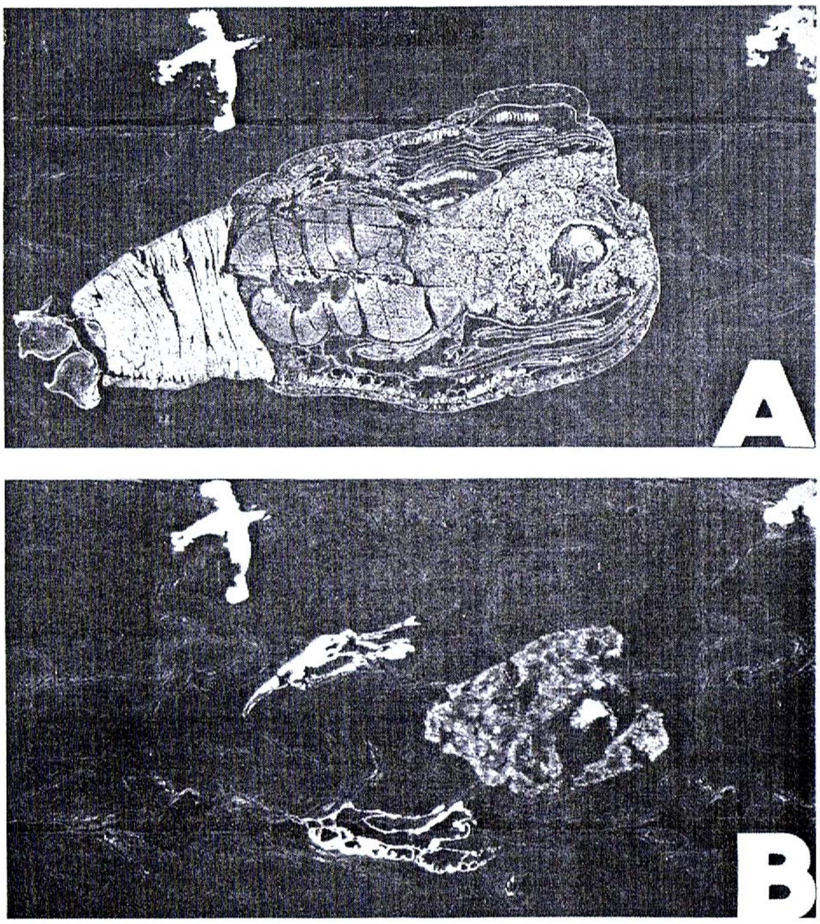
ภาพผนวกที่ 10 การสะสมโคบอลต์-57 ของหอยแมลงภู่ *M. edulis*

ที่มา: Van Weers (1973)



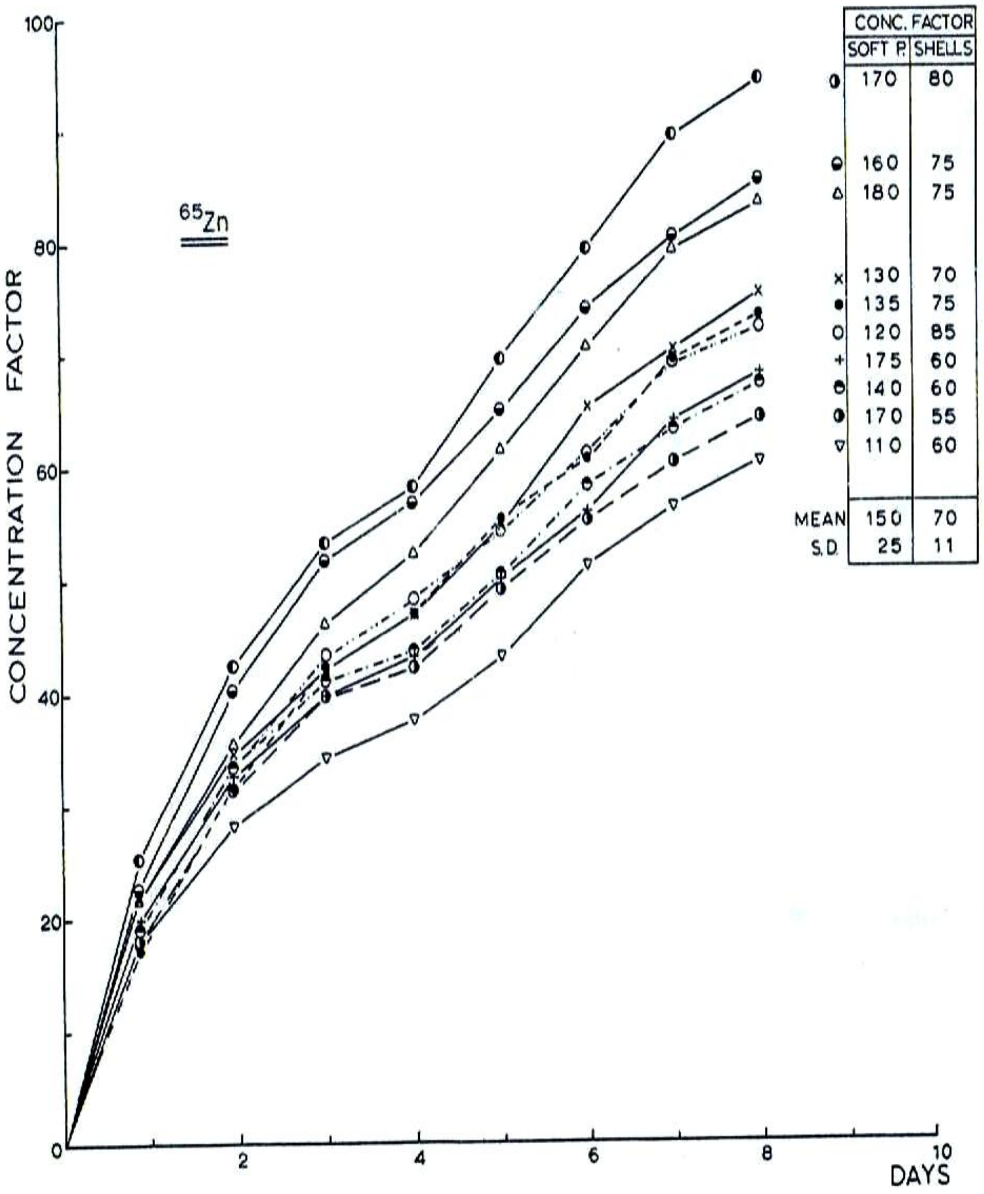
ภาพผนวกที่ 11 การขับโคบอลต์-57 ออกจากตัวหอยแมลงภู่ *M. edulis*

ที่มา: Van Weers (1973)



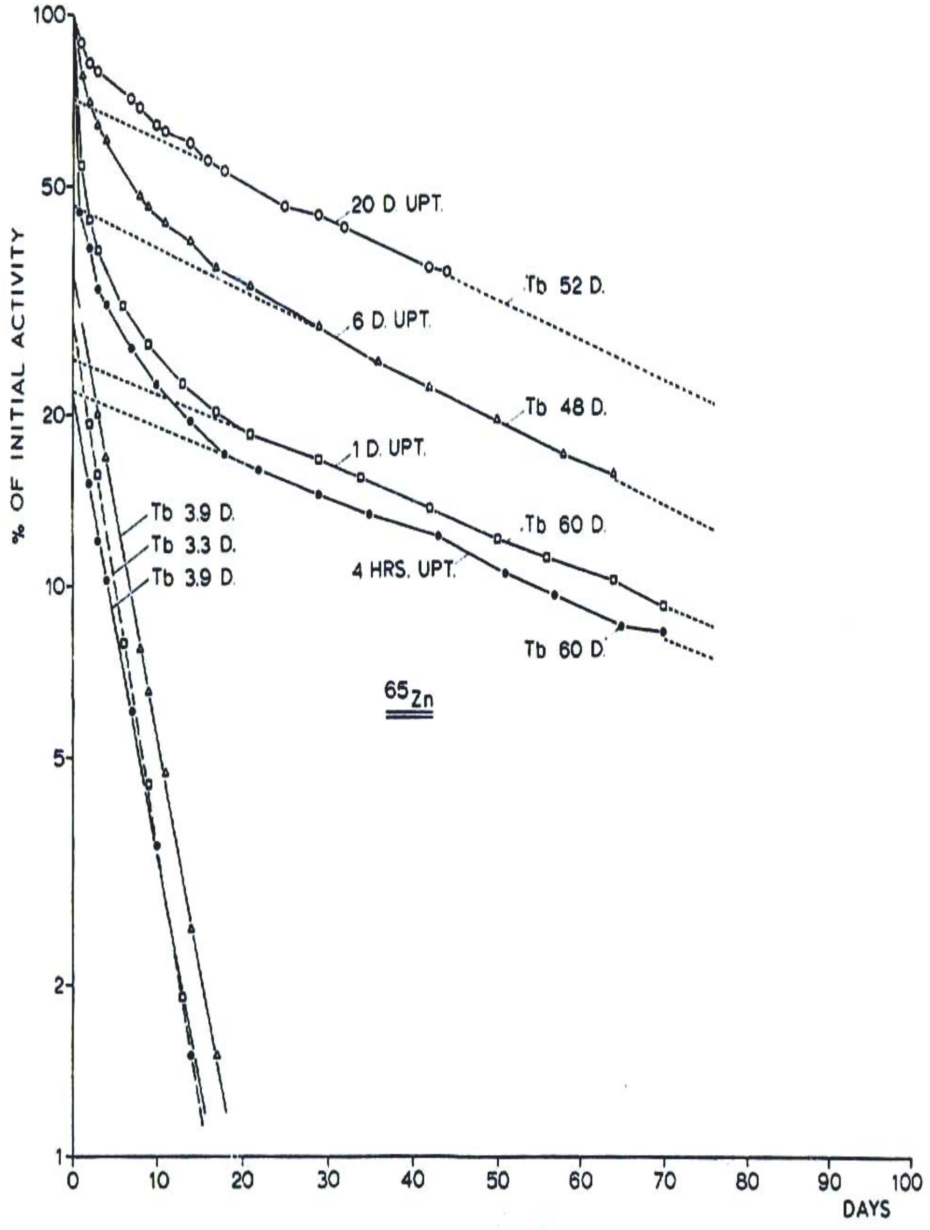
ภาพผนวกที่ 12 การสะสมของโคบอลต์-57 ในส่วนอวัยวะทั้งตัวของแมลงภู่ *M. edulis* โดยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Autoradiography (A) และแสดงภาพแบบ negative (B) บริเวณสว่างคือการสะสมของโคบอลต์-57 ที่ไตทั้ง 2 ข้างและระบบย่อยอาหาร

ที่มา: Van Weers (1973)



ภาพผนวกที่ 13 การสะสมสังกะสี-65 ของหอยแมลงภู่ *M. edulis*

ที่มา: Van Weers (1973)



ภาพผนวกที่ 14 การขับสังกะสี-65 ออกของหอยแมลงภู่ *M. edulis*

ที่มา: Van Weers (1973)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายนิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ.2508
สถานที่เกิด	ตำบลสวนหลวง อำเภอพระโขนง จ.กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	2527 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนมัธยมวัดธาตุทอง
	2531 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตประสานมิตร
ตำแหน่งหน้าที่	นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์
การงานปัจจุบัน	ศูนย์จัดการกากกัมมันตรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
สถานที่ทำงาน ปัจจุบัน	16 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จ. กรุงเทพฯ 10900