



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

ระดับกัมมันตภาพรังสีในดินตะกอนบริเวณจังหวัดชลบุรี

Radioactivity Levels in Marine Sediment Collected in Chonburi Province

نامผู้วิจัย

นางสาวชลธิชา เผ่าผาง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทรี ขุนทอง, วศ.ค. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ระดับกัมมันตภาพรังสีในดินตะกอนบริเวณจังหวัดชลบุรี

Radioactivity Levels in Marine Sediment Collected in Chonburi Province

โดย

นางสาวชลธิชา เผ่าผาง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชลธิชา เผ่าผาง 2556: ระดับกัมมันตภาพรังสีในดินตะกอนบริเวณจังหวัดชลบุรี  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขารังสีประยุกต์และ  
ไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุขประเสริฐ, Ph.D. 103 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดระดับกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณ  
อ่าวไทยตอนบน จังหวัดชลบุรี และเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในดินตามรายงานของ UNSCEAR โดย  
เก็บตัวอย่างดินตะกอนจากชายฝั่งทะเล ตั้งแต่ตำบลนาเกลือ-ตำบลอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี จำนวน 10  
จุด ใน 3 ฤดูกาลคือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน วิเคราะห์กัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องแกมมาสเปก  
โตรมิเตอร์ หัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง เปรียบเทียบด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6  
ใช้เวลานับวัด 60,000-80,000 วินาที ผลการวิเคราะห์ไม่พบซีเซียม-137 ซึ่งเป็นนิวไคลด์  
กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น แต่พบนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติได้แก่ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-  
232 และโพแทสเซียม-40 ในฤดูฝนมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ  $44 \pm 10$ ,  $59 \pm 17$  และ  $463 \pm 94$   
เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ฤดูหนาว  $41 \pm 6$ ,  $50 \pm 9$  และ  $484 \pm 83$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม  
ตามลำดับ และฤดูร้อน  $39 \pm 6$ ,  $41 \pm 7$  และ  $472 \pm 81$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่า  
ค่าเฉลี่ยตามรายงานของ UNSCEAR คือ 35, 30 และ 400 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ  
อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าบังชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ พบว่าอยู่  
ในเกณฑ์ปกติ เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีใน  
ดินตะกอนด้วย ANOVA พบว่า ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ในแต่ละฤดูกาลไม่แตกต่างกันอย่าง  
มีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่โพแทสเซียม-40 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )  
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปัจจัยอื่น ได้แก่ขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรีย์วัตถุ พบว่าตัวอย่าง  
ดินตะกอนนี้จัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อหยาบ และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในระดับต่ำ โดยมีความ  
สอดคล้องกับชนิดและปริมาณของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ตรวจพบ สำหรับปริมาณ โลหะหนักและ  
ชนิดของสัตว์หน้าดินพบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่พบในดินตะกอน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chonticha Phaophang 2013: Radioactivity Levels in Marine Sediment Collected in Chonburi Province. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanwisa Sudprasert, Ph.D. 103 pages.

This research aimed to measure radioactivity levels in marine sediment collected in some areas of Chonburi Province and compared with typical values of those in soil reported by UNSCEAR. Sediment samples were collected from 10 sites along the seashore of Sriracha, Chonburi province during the rainy, winter, and summer season. Radioactivity were analysed using gamma spectrometry with a high purity germanium detector (HPGe) using IAEA Soil-6 as a reference material. The samples were counted for 60,000–80,000 seconds. The artificial radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  was not found in this study. The detected radionuclides were related to the naturally occurring isotopes  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ . The average specific activities were found to be  $44\pm 10$  Bq/kg of  $^{238}\text{U}$ ,  $59\pm 17$  Bq/kg of  $^{232}\text{Th}$  and  $463\pm 94$  Bq/kg of  $^{40}\text{K}$  in rainy;  $41\pm 6$  Bq/kg of  $^{238}\text{U}$ ,  $50\pm 9$  Bq/kg of  $^{232}\text{Th}$  and  $484\pm 83$  Bq/kg of  $^{40}\text{K}$  in winter; and  $39\pm 6$  Bq/kg of  $^{238}\text{U}$ ,  $41\pm 7$  Bq/kg of  $^{232}\text{Th}$  and  $472\pm 81$  Bq/kg of  $^{40}\text{K}$  in summer, which were higher than the UNSCEAR's reported values of 35, 30, and 400 Bq/kg for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively. However the values of hazard index of natural radionuclides in sediment samples were found to be normal. In addition, the statistical analysis using ANOVA of radionuclide activities among season found that  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  were not significantly different ( $p > 0.05$ ), whereas  $^{40}\text{K}$  was significantly different ( $p < 0.05$ ). Other factors including particle size and amount of organic matter in sediment were found to be relative with the radioactivity level found in sediment, whereas the amount of heavy metal and kind of benthos were not related to the detected radionuclides.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุกประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทรี ขุนทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำ ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดทั้งจากการค้นคว้าและจากการทดลองรวมถึงการ แก้ไขความถูกต้องของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณรัชชัย อธิพิพนธกร นักฟิสิกส์รังสีชำนาญการ สำนักสนับสนุนการ กำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ นักวิจัยที่รับผิดชอบ โครงการวิจัยรองรับที่ให้คำปรึกษาและแนะนำการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณธงชัย สุกประเสริฐ ผู้อำนวยการกลุ่มมาตรฐานการวัดรังสีและ กำมันตภาพรังสี สำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงาน ปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการคณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือในการวิเคราะห์ ตัวอย่าง และขอขอบพระคุณหัวหน้าสถานีวิจัยประมงศรีราชา และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความ อนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย ภายใต้ โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ผนвт.)

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ประโยชน์ไคอัน เนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เมตตาอบรม สั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

ชลธิชา เผ่าผาง  
เมษายน 2556

## สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	44
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	67
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก ผลการหาเวลานับวัดที่เหมาะสม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง และผลการวัดนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน	78
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ และผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนทั้งสามฤดูกาล	86
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนในแต่ละฤดูกาล	91
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอนและในสัตว์หน้าดิน และค่ามาตรฐานโลหะหนักในดินตะกอนทะเลของต่างประเทศ	93
ภาคผนวก จ วิธีการวิเคราะห์ชนิดสัตว์หน้าดินในดินตะกอน	101
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การจัดกลุ่มขนาดอนุภาคดินตะกอน	13
2	การประเมินปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน	14
3	ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน	36
4	พิกัดของจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 10 จุด	38
5	ความคงที่ของระบบวัดรังสีจากการวัดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137	46
6	ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนทั้งสามฤดูกาล	50
7	ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในดินตะกอนจากแหล่งต่างๆทั่วโลก	52
8	ค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่างๆของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ	53
9	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน	55
10	ค่าเฉลี่ยของโลหะหนักในดินตะกอน	58
11	ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำทะเลในวันที่เก็บตัวอย่าง	58
12	ผลการจำแนกสัณฐานดินในตัวอย่างดินตะกอนทั้งสามฤดูกาล	62
ตารางผนวกที่		
ก1	ประสิทธิภาพของห้ววัดรังสีเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6	79
ก2	ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนครั้งที่ 1 (ฤดูฝน)	84
ก3	ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนครั้งที่ 2 (ฤดูหนาว)	84
ก4	ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนครั้งที่ 3 (ฤดูร้อน)	85
ข1	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนครั้งที่ 1 (ฤดูฝน)	89
ข2	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนครั้งที่ 2 (ฤดูหนาว)	89
ข3	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนครั้งที่ 3 (ฤดูร้อน)	90
ค1	ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนแต่ละฤดูกาล	92
ง1	ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอน	94

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง2	ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในสัตว์หน้าดิน	97
ง3	ค่าเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักในดินประเทศไทยและสหภาพยุโรป	99
ง4	เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินตะกอนสำหรับแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเล	100

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของชายฝั่งทะเล	8
2	การสลายตัวของอนุกรมนิวไคลด์กัมมันตรังสี	10
3	ไดอะแกรมสามเหลี่ยมสำหรับพิจารณาประเภทเนื้อดิน	12
4	แผนผังระบบวัดรังสีแกมมา	19
5	แถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ	20
6	การเปลี่ยนแปลงของช่องว่างพลังงานกับอุณหภูมิ	21
7	โครงสร้างของหัววัด HPGe แบบเพลนนา	23
8	ภาคตัดขวางของหัววัดรังสี HPGe แบบโคเอกเซียล	23
9	ส่วนประกอบโดยละเอียดของระบบวัด HPGe	25
10	สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดด้วยหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ	26
11	การหาค่า FWHM ของซีเซียม-137 ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์	27
12	การเปรียบเทียบความสามารถในการแยกแยะพลังงานของหัววัดรังสีชนิดต่างๆ	28
13	ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้น	29
14	แผนที่จุดเก็บตัวอย่าง	39
15	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมากับช่องพลังงาน	44
16	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดกับพลังงานรังสีแกมมา	45
17	ค่ากัมมันตภาพรวมของตัวอย่างแต่ละฤดูกาล	52
ภาพผนวกที่		
ก1	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับเรเดียม-226	80
ก2	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว-212	80
ก3	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว-214	81
ก4	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับแทลเลียม-208	81

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก5	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับบิทมัส-214	82
ก6	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับบิทมัส-212	82
ก7	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับแอกติเนียม-228	83
ก8	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับโพแทสเซียม-40	83

## ระดับกัมมันตภาพรังสีในดินตะกอนบริเวณจังหวัดชลบุรี

### Radioactivity Levels in Marine Sediment Collected in Chonburi Province

#### คำนำ

โดยทั่วไปมนุษย์มีโอกาสได้รับรังสีที่เกิดจากการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีในชีวิตประจำวัน ทั้งทางตรง เช่นการวินิจฉัยหรือรักษาโรค โดยการใช้รังสี และทางอ้อม เช่นจากการบริโภคอาหารและน้ำ ซึ่งสารกัมมันตรังสีเหล่านี้มีอยู่ทุกหนแห่งในธรรมชาติ โดยเกิดจากสองแหล่งกำเนิดคือ นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (artificial radionuclides) และนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural radionuclides) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบของโลกตั้งแต่ที่มีการก่อกำเนิดขึ้น ในขณะที่โลกยังร้อนอยู่เกิดการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติที่มีชีวิตยาวนาน เช่น ยูเรเนียม ทอเรียม และ โพแทสเซียม เกิดขึ้นในธรรมชาติในรูปของสารประกอบออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ฟอสเฟต ซัลเฟต วานาเดตและซิลิเกต (Abdi *et al.*, 2008) นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะอยู่ในระดับคงที่แต่ในทางตรงกันข้าม นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น การทดลองอาวุธนิวเคลียร์ การเกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ รวมไปถึงการทิ้งกากกัมมันตรังสี เป็นต้น (Xiang *et al.*, 2007)

จากที่ทราบกันดีว่าในปัจจุบันมีการนำประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์มาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น แม้ว่าประเทศไทยจะยังไม่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่ก็มีการใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม และมีแนวโน้มว่าการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีนิวเคลียร์จะขยายวงกว้างขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งกิจกรรมต่างๆเหล่านี้อาจส่งผลให้ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมีเพิ่มมากขึ้นหรือมีผลทำให้ระดับกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน (Abdi *et al.*, 2008) นอกจากนี้สิ่งที่ไม่ควรจะละเลยคือ การที่ประเทศใกล้เคียงก็ได้มีการใช้ประโยชน์ทางด้านนิวเคลียร์อย่างแพร่หลายเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ซึ่งในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีความจำเป็นที่จะต้องเลือกที่ตั้งให้อยู่ใกล้กับแหล่งน้ำขนาดใหญ่ เพื่อใช้น้ำปริมาณมากในการหล่อเย็นเครื่องปฏิกรณ์ จากสาเหตุนี้อาจทำให้มีการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีลงสู่แหล่งน้ำซึ่งหมายถึงทะเลหรือมหาสมุทรได้ โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติและนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นใน

สิ่งแวดล้อมทางทะเลนั้นมีต้นกำเนิดที่แตกต่างกัน ต้นกำเนิดหลักของนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติเกิดจากสภาพดินฟ้าอากาศและวัฏจักรบนพื้นดินและหินทำให้เกิดเป็นนิ่วโคลด์ต่างๆ เช่น โปแทสเซียม-40 รูบิเดียม-87 ทอเรียม-232 ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 หลังจากมีการสลายตัวก็ทำให้เกิดนิ่วโคลด์และธาตุที่สำคัญเกิดขึ้นมา เช่น เรเดียม เรดอน พลูโตเนียม และตะกั่ว ซึ่งนิ่วโคลด์เหล่านี้มักจะเกิดการสะสมลงสู่ดินตะกอน และสะสมอยู่เป็นระยะเวลายาวนาน และดินตะกอนยังถือได้ว่าเป็นที่รองรับและเก็บกักสิ่งต่างๆ ไว้ได้มากกว่าส่วนอื่นๆ เช่นน้ำ หรือสิ่งมีชีวิตในน้ำ เพราะลักษณะของดินตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย (Noureddine *et al.*, 1998) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีบทบาทสำคัญต่อการสะสมนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน เช่น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ องค์ประกอบทางธรณีเคมีและขนาดอนุภาคของดินตะกอน เป็นต้น (Tsabaris *et al.*, 2007)

เพื่อเป็นการเฝ้าระวังสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน บริเวณจังหวัดชลบุรี จึงเกิดแนวคิดการทำงานวิจัยนี้ โดยมีเป้าหมายเพื่อตรวจวัดนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีและรวบรวมเป็นฐานข้อมูลของนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณส่วนหนึ่งของอ่าวไทยตอนบน โดยแบ่งการเก็บตัวอย่างเป็น 3 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลต่อการสะสมนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน และปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการสะสมนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน ได้แก่ ขนาดอนุภาค ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณโลหะหนัก และชนิดของสัตว์หน้าดิน โดยข้อมูลที่ได้นี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลบริเวณนี้ในอนาคตได้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนบน ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพและรวบรวมเป็นฐานข้อมูลของระดับกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนบน
2. เพื่อเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดต่างๆที่ตรวจพบได้ กับค่าที่รายงานโดย UNSCEAR
3. เพื่อประเมินความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติที่ตรวจพบ โดยการคำนวณค่าบ่งชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ
4. เพื่อศึกษาผลของฤดูกาล ขนาดอนุภาค ปริมาณอินทรีย์วัตถุและโลหะหนักต่อการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน

## การตรวจเอกสาร

### 1. ทะเลอ่าวไทย

อ่าวไทยอยู่บริเวณทะเลจีนใต้ (มหาสมุทรแปซิฟิก) ระหว่างพิกัดที่ 5 องศา 0 ลิปดา 13 องศา 30 ฟลิปดาเหนือ และลองจิจูดที่ 99 องศา 106 องศาตะวันออก (Cheevaporn and Menasveta, 2003) เป็นส่วนในสุดของมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันตกเชื่อมต่อมาจกด้านตะวันตกของทะเลจีนใต้ มีลักษณะเป็นอ่าวกึ่งปิด (ส่วนธรณีวิทยาทางทะเล [สทช.], 2555) ล้อมรอบด้วยประเทศไทย มาเลเซีย กัมพูชา และเวียดนาม มีพื้นที่ 300,858.76 ตารางกิโลเมตร และมีชายฝั่งทอดยาว 1,840 กิโลเมตร มีความลึกเฉลี่ย 45 เมตร จุดที่ลึกที่สุดมีความลึก 80 เมตร (Burnett *et al.*, 2007) บริเวณอ่าวไทยตอนบนเกิดจากการไหลรวมกันของแม่น้ำหลักสี่สายคือ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำบางปะกง โดยมีอัตราการระบายของแข็งแขวนลอยของแม่น้ำทั้งสี่สายลงสู่อ่าวไทยตอนบนประมาณ 6.32 ล้านตันต่อปี ทำให้เกิดการสะสมของตะกอนสูงถึง 0.8 เซนติเมตรต่อปี (Meksumpun *et al.*, 2005) น้ำจืดปริมาณมากที่ไหลมาจากแม่น้ำต่างๆทำให้น้ำทะเลในอ่าวไทยมีระดับความเค็มต่ำ (ร้อยละ 3.05-3.25) และมีตะกอนสูง ส่วนบริเวณที่มีความลึกกว่า 50 เมตร จะมีความเค็มสูงกว่า ประมาณร้อยละ 3.4 ซึ่งเกิดจากน้ำทะเลที่ไหลเข้ามาจากทะเลจีนใต้ (Polphong *et al.*, 1984)

กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ได้จำแนกอ่าวไทยออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งอ่าวไทยตอนบน หรืออ่าวไทยรูปตัว "ก" มีแนวเส้นโค้งตั้งแต่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ถึงแหลมแสมสาร อำเภอสตึก จังหวัดชลบุรี เป็นขอบเขตด้านใต้ ส่วนที่สองอ่าวไทยตอนกลาง มีเขตตั้งแต่แนวเส้นโค้งอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ถึงแหลมแสมสาร ลงไปทางใต้จนถึงแนวเส้นโค้งจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี ไปจรดขอบฝั่งด้านตะวันออก และส่วนที่สามอ่าวไทยตอนล่าง คือ บริเวณแนวเส้นโค้งจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี ไปจรดขอบฝั่งทางตะวันออกลงไปทางใต้ (สทช., 2555)

สำหรับลักษณะภูมิประเทศของท้องทะเลในอ่าวไทยจะไม่ราบเรียบ แต่มีสันและแอ่งมากมายที่วางตัวขนานกันไปในทางแนวเหนือ-ใต้ในลักษณะของกราเบน (graben) และกึ่งกราเบน (half graben) บริเวณพื้นทะเลของอ่าวไทยประกอบไปด้วยองค์ประกอบของดินเหนียวและทรายผสมกันอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริเวณพื้นที่ (ศรีบุญญา, 2553)

## 1.1 ลักษณะทางอุทกศาสตร์ชายฝั่ง

ในเอกสารเผยแพร่ของสำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ฉบับที่ 28 (ปริทัศน์, 2550) กล่าวว่า ลักษณะทางอุทกศาสตร์ชายฝั่งหรือกระบวนการชายฝั่งหมายถึง กระบวนการของลม คลื่น กระแสน้ำ และน้ำขึ้นน้ำลง ที่เกิดขึ้นในทะเลและบริเวณชายฝั่ง ซึ่งมีผลต่อการเกิดและเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลโดยมีอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

### 1. ลมมรสุม

สภาพภูมิศาสตร์ของอ่าวไทย ที่ตั้งอยู่ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร ลักษณะภูมิศาสตร์เช่นนี้ทำให้เกิดความกดอากาศทั้งสูงและต่ำ ซึ่งมีผลต่อการเกิดลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้ ที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของลมตรงข้ามกันอย่างสิ้นเชิง ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะเกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนตุลาคมถึงกุมภาพันธ์ มีผลให้ลมในฤดูนี้เคลื่อนที่จากตะวันออกเฉียงเหนือมาสู่ตะวันตกเฉียงใต้ มีอิทธิพลต่อการเกิดคลื่นในบริเวณอ่าวไทยด้านตะวันตก จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลบริเวณภาคใต้เป็นหลัก ส่วนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดผ่านอ่าวไทยระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน มีอิทธิพลต่อการเกิดคลื่นในบริเวณอ่าวไทย และส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกเฉียงใต้เป็นส่วนใหญ่

### 2. พายุหมุนเขตร้อน

อ่าวไทยเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากพายุหมุนเขตร้อนประเภทพายุดีเปรสชัน ที่มีขนาดความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางน้อยกว่า 63 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (34 นอต) ซึ่งเป็นพายุที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด ส่งผลทำให้เกิดฝนตกหนัก คลื่นลมในทะเลรุนแรงและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งตามธรรมชาติในบริเวณพื้นที่ที่พายุพัดผ่าน

### 3. คลื่น

ในฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ คลื่นลมในอ่าวไทยค่อนข้างจะสงบ ขณะที่ในฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทะเลจะมีคลื่นจัดโดยมีความสูงคลื่นมากกว่า 2 เมตร ลักษณะของคลื่นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง นอกจากความสูงของคลื่นแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงคาบของคลื่น

ด้วย เพราะคลื่นที่มีคาบยาวจะส่งผลให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนชายฝั่งและไถลขึ้นบนชายฝั่ง ได้มากกว่าคลื่นที่มีคาบสั้น นอกจากนี้ทิศทางของคลื่น นับเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของคลื่นที่เข้ากระทบชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพธรรมชาติตามปกติ

#### 4. น้ำขึ้นน้ำลง

อ่าวไทย มีการขึ้นลงของน้ำทะเลในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในเขตอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง พบลักษณะการขึ้นลงของน้ำทะเลทั้ง 2 แบบ ได้แก่ น้ำเดียว คือ น้ำขึ้น 1 ครั้งและน้ำลง 1 ครั้งต่อวัน และน้ำผสม ที่มีลักษณะการขึ้นลงของน้ำไม่เป็นระบบแน่นอน มีทั้งน้ำขึ้น 2 ครั้ง และน้ำลง 2 ครั้งต่อวัน และน้ำขึ้น 1 ครั้ง และน้ำลง 1 ครั้งต่อวัน ซึ่งทั้งสองแบบจะมีความสูงและเวลาน้ำขึ้นที่แตกต่างกันมาก

#### 1.2 ลักษณะทางธรณีสัณฐานชายฝั่ง

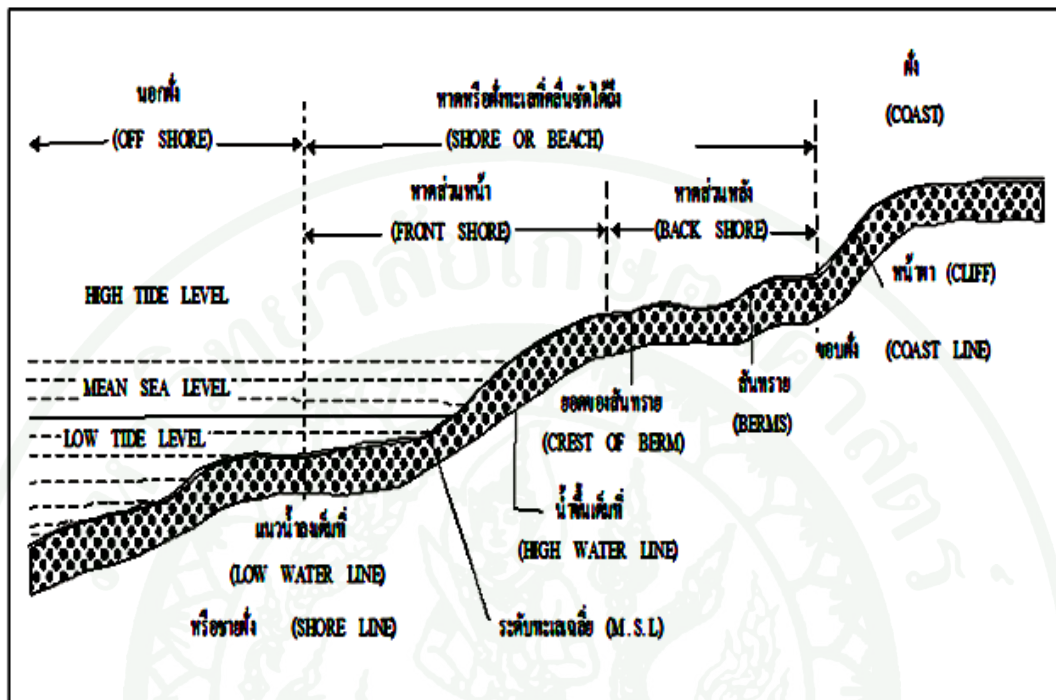
ธรณีสัณฐานชายฝั่ง (coastal geomorphology) เป็นลักษณะรูปร่างของพื้นที่ชายฝั่ง ตั้งแต่เริ่มต้นเกิดขึ้นแล้วมีวิวัฒนาการเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการทางธรณีวิทยาจนมีรูปลักษณ์อย่างที่พบในปัจจุบัน ธรณีสัณฐานชายฝั่งด้านอ่าวไทย ที่พบเห็นอยู่ในปัจจุบัน มีลักษณะชายฝั่งยาวขนานไปกับแนวภูเขาและพื้นที่สูง ซึ่งเป็นแผ่นดินตอนกลางของภาคใต้ โดยมีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องตามกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาและสภาพแวดล้อมโลก สำหรับธรณีสัณฐานชายฝั่งด้านอ่าวไทยจำแนกออกได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบมีการกำเนิดและสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน (ภาพที่ 1)

1. แหวมแผ่นดิน (head land) หมายถึง ส่วนของแผ่นดินที่ติดหรือยื่นลงไปในทะเล มีลักษณะเป็นหน้าผาชันหรือแหลมยื่น ซึ่งเป็นส่วนเหลือค้างจากการกัดกร่อนจากอิทธิพลของทะเล

2. ตะพักทะเล (marine terrace) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ราบหรือเกือบราบ เกิดจากการลดระดับของน้ำทะเลหรือการยกตัวของแผ่นดิน

3. ที่ราบน้ำทะเลเคยท่วมถึง (former tidal flat) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่อดีตเคยอยู่ในอิทธิพลของน้ำทะเลท่วมถึง ซึ่งปัจจุบันน้ำทะเลไม่ท่วมแล้ว

4. ที่ราบน้ำทะเลท่วมถึง (active tidal flat) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่ได้รับอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง
5. หาดโคลน (mud flat) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งซึ่งมีสภาพพื้นที่เป็นดินโคลนที่ไม่มีโครงสร้าง บางส่วนอยู่ในเขตอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง มักพบบริเวณชายฝั่งทะเลที่มีลมสงบ
6. สันทรายและเนินทราย (beach ridge and sand dune) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่เป็นแนวสันทรายขนานกับแนวชายฝั่งที่เกิดจากอิทธิพลของกระแสน้ำ คลื่น และลม
7. หาดทราย (beach) หมายถึง ลักษณะของชายฝั่งที่เกิดจากอิทธิพลของคลื่นและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลที่พัดพาเม็ดทรายมาสะสมเป็นแนวยาว
8. ร่องน้ำระหว่างสันทราย (runnel) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่เป็นลักษณะแนวร่องน้ำที่ยาวขนานไปกับสันทรายและมีน้ำขังอยู่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ
9. ชวาทะเล (estuary) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่เป็นพื้นที่ปากแม่น้ำขนาดใหญ่ คล้ายอ่าว ปัจจุบันมีอิทธิพลของตะกอนจากลำน้ำในแผ่นดินไหลมาทับถมในสภาวะน้ำกร่อย
10. ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ (delta) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเลที่ถูกทับถมด้วยตะกอนน้ำจืดและน้ำทะเล เป็นส่วนหนึ่งของชวาทะเล ส่วนใหญ่ไหลลงสู่น้ำแล้ว
11. ลากูน (lagoon) หมายถึง ส่วนชายฝั่งทะเลที่มีลักษณะเป็นแอ่งน้ำและเกือบถูกปิดล้อมหรือปิดล้อมแล้ว แต่ยังคงอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำทะเล
12. ที่ลุ่มชื้นแฉะและที่ลุ่มน้ำขัง (marsh and swamp) หมายถึง ส่วนของชายฝั่งทะเล เป็นที่ลุ่มชื้นแฉะและที่ลุ่มน้ำขัง ซึ่งเคยอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำทะเลมาก่อน
13. เนินทรายนอกชายฝั่งทะเล (off shore bar) คือ ส่วนชายฝั่งทะเลที่เป็นเนินทรายนอกชายฝั่งทะเล พบบริเวณเขตอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง อาจเห็นเป็นสันทรายในทะเลและมักจะมุดอยู่ใต้ทะเล



ภาพที่ 1 ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของชายฝั่งทะเล

ที่มา: เผล็จ (2548)

## 2. ดินตะกอน (sediment)

ดินตะกอนเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างดินหรือลักษณะทางธรณีวิทยาอื่นกับน้ำผิวดิน ดินตะกอนประกอบด้วยสสารที่ถูกน้ำกัดกร่อน เช่น ทราย ดินเหนียว นอกจากนี้ดินตะกอนยังประกอบด้วยสารอินทรีย์แร่ธาตุต่างๆที่ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ และอนุภาคที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำเอง เช่น ซากแพลงก์ตอน รวมถึงสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ดินตะกอนมีความสำคัญทั้งในด้านนิเวศวิทยาและด้านสิ่งแวดล้อม เพราะเป็นทั้งที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารของสัตว์หน้าดิน คุณลักษณะของดินตะกอนสามารถบ่งชี้ถึงความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนของสารต่างๆ ได้ดีกว่าการใช้คุณลักษณะของน้ำเป็นตัวบ่งชี้ เพราะนอกจากจะเป็นแหล่งกักเก็บสารในลำดับท้ายแล้ว คุณลักษณะของดินตะกอนจะแปรผันตามเวลาน้อยกว่าน้ำ องค์ความรู้เกี่ยวกับรูปแบบของดินตะกอนมีความสำคัญสำหรับการศึกษาการปนเปื้อนในดินตะกอน (IAEA, 2003) เพราะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของดินตะกอน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาปัจจัยเหล่านั้นร่วมด้วย

## 2.1 แหล่งกำเนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมในดินตะกอน

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันหรือผลพลอยได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน (fission products) และกระบวนการกระตุ้น (activation process) โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้เมื่อถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแล้ว จะเกิดการปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อมตามลักษณะวิถีทางที่แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถแบ่งประเภทต้นกำเนิดของการเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีหลักๆ ได้ดังนี้ (IAEA, 1989)

### 1. ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน (fission products)

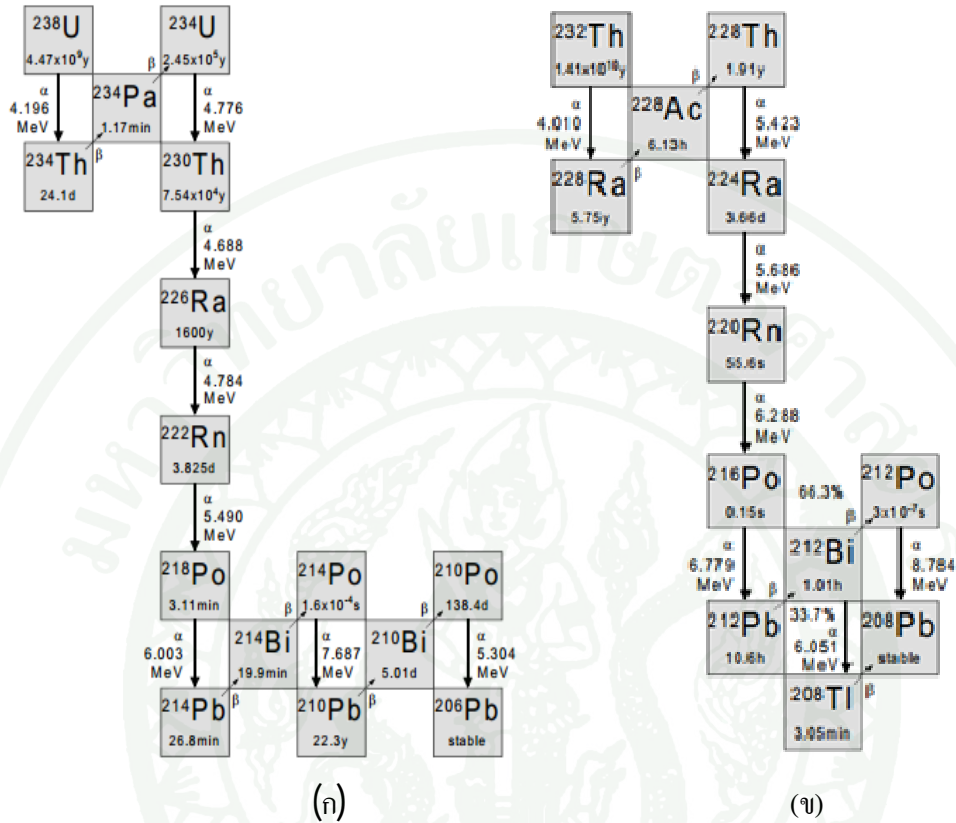
แหล่งกำเนิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีหลักเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันและพบในสิ่งแวดล้อม ซึ่งนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้มีชีวิตอยู่เป็นระยะเวลากว่า 3 ทศวรรษ แต่ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดของผลพลอยได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน เกิดจากอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ การหลอมละลายของเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยนิวไคลด์กัมมันตรังสี (IAEA, 1989)

### 2. กระบวนการกระตุ้น (activation process)

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการกระตุ้นที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรืออุปกรณ์ทางนิวเคลียร์อื่นๆ โดยการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับวัสดุเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ไอโซโทปของธาตุทรานยูเรนิค และไอโซโทปรังสีของไฮโดรเจน คาร์บอน ซีเซียม โคบอลต์ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และกลุ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่นๆ (IAEA, 1989)

### 3. กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ (natural radioactivity)

กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติเป็นส่วนหนึ่งของกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม เช่น อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และโพแทสเซียม-40 (IAEA, 1989) ซึ่งเป็นแหล่งกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ต้องได้รับอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยอนุกรมนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2 เกิดเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่นๆ อีกมากมาย (Eikenberg, 2002)



ภาพที่ 2 การสลายตัวของอนุกรมนิวไคลด์กัมมันตรังสี อนุกรมยูเรเนียม (ก) อนุกรมทอเรียม (ข)

ที่มา: Eikenberg (2002)

## 2.2 การตรวจสอบการปนเปื้อนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน

การปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนเริ่มจากในน้ำ แต่การปนเปื้อนไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะในน้ำ นิวไคลด์กัมมันตรังสีปริมาณมากจะถูกดูดซับลงและสะสมในดินตะกอนตามระยะเวลา อีกทั้งดินตะกอนเป็นส่วนหนึ่งของการปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร และสัตว์น้ำเป็น สิ่งมีชีวิตจำนวนมากที่อาศัยอยู่ในหรือบนดินตะกอนหรือใช้เป็นแหล่งอาหาร จึงอาจทำให้ได้รับการปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีไปด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบการปนเปื้อนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน โดยมี 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้ (IAEA, 2010)

### 1. การตรวจสอบดินตะกอนพื้นผิว (surface sediment monitoring)

การตรวจสอบดินตะกอนพื้นผิวจะทำเพื่อเก็บข้อมูลของการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นใหม่ การตรวจสอบในลักษณะนี้ จะดำเนินการด้วยความถี่ค่อนข้างสูงจากรายเดือนถึงรายปี แต่ปัญหาของการตรวจสอบแบบนี้ คือ ชั้นผิวหน้าของดินตะกอนยังมีลักษณะอ่อนนุ่มและสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงอาจทำให้ตัวอย่างจากชั้นผิวหน้าของดินตะกอนได้รับการรบกวนได้ง่าย

### 2. การตรวจสอบดินตะกอนแขวนลอย (suspended sediment monitoring)

การตรวจสอบแบบนี้มีวัตถุประสงค์เดียวกับการตรวจสอบดินตะกอนพื้นผิว โดยจะทำการเก็บดินตะกอนแขวนลอยที่ระยะประมาณ 1 เมตร เหนือชั้นผิวหน้าของดินตะกอน ความถี่ของการตรวจสอบแบบนี้จะเป็นรายเดือนจนถึงทุกๆสามเดือน

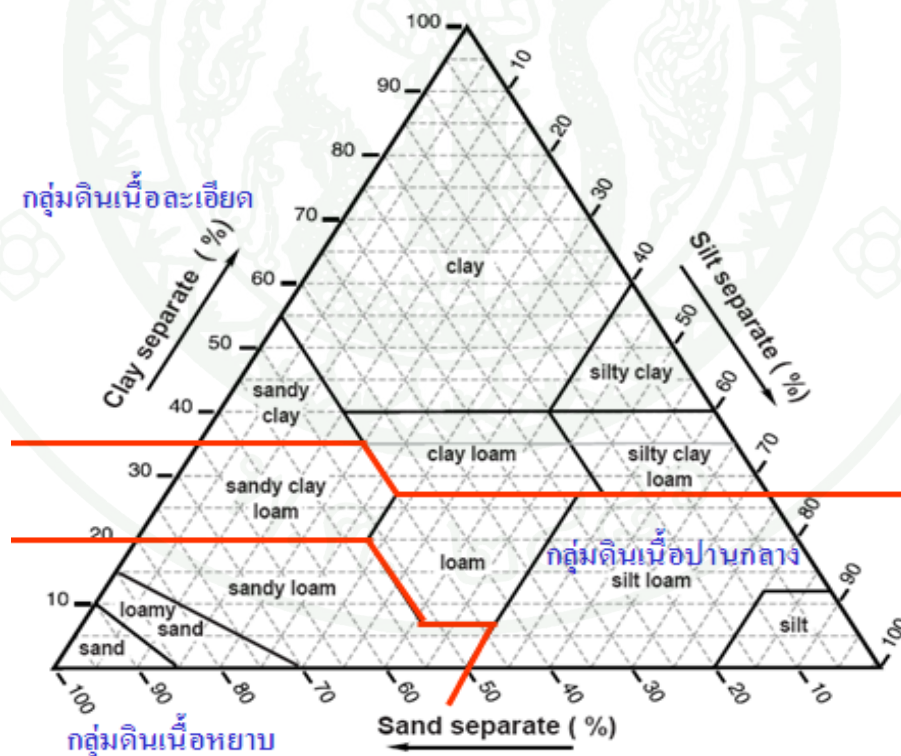
### 3. การตรวจสอบชั้นดินตะกอนตอนล่าง (lower layer sediment monitoring)

การตรวจสอบแบบนี้ ทำเพื่อเก็บข้อมูลของการปนเปื้อนที่ผ่านมาแล้ว ความถี่ของการตรวจสอบมักจะเป็นรายปี การเก็บตัวอย่างในลักษณะนี้จะเก็บตัวอย่างแบบกระบอกเจาะ (core sampling) และนำตัวอย่างดินตะกอนมาตัดให้มีความหนาเท่าๆกัน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ เพื่อศึกษาการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในชั้นของดินตะกอนที่ลึกลงไป

## 2.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอน

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน เพราะนอกจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแล้ว ขนาดอนุภาคก็มีผลต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนเช่นกัน (Nouredine *et al.*, 1998) อนุภาคของดินตะกอน มีหลายรูปทรงและมีขนาดแตกต่างกัน เนื่องจากอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยหลายอย่าง เช่น กรวด ทราย ตะกอน สารอินทรีย์ เป็นต้น คุณสมบัติของดินตะกอนจะขึ้นกับองค์ประกอบเหล่านี้ การจำแนกประเภทเนื้อดินทำให้สามารถประเมินคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินตะกอนคร่าวๆได้ อนุภาคเดียวของดินตะกอนมีมากมายหลายขนาด นับตั้งแต่ขนาดใหญ่ซึ่งมองเห็นด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดเล็กจนมองไม่เห็น

ด้วยเหตุที่ดินตะกอนมีอนุภาคมากมายเกินกว่าที่จะแยกพิจารณาทีละอนุภาคได้ จึงจำเป็นต้องจัดแบ่งอนุภาคเหล่านี้ออกเป็นกลุ่มขนาด (size class) และมีชื่อเฉพาะของแต่ละกลุ่มขนาดเพื่อความสะดวกในการกล่าวถึง อนุภาคที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน อาจมีขนาดแตกต่างกันได้ การแบ่งกลุ่มขนาดอนุภาคมีหลายเกณฑ์ ซึ่งแต่ละพื้นที่จะเลือกใช้เกณฑ์แตกต่างกัน เช่น อเมริกาเหนือนิยมใช้เกณฑ์ของ Wentworth ส่วนที่อื่นๆนิยมใช้เกณฑ์สากล (Bartram and Balance, 1996) การหาขนาดอนุภาคทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ตะแกรงร่อน การใช้ไฮโดรมิเตอร์และการใช้หลอดดูด (วรารกร และคณะ, 2525; Carter, 1993) เมื่อทราบการกระจายขนาดอนุภาค ก็สามารถแยกประเภทเนื้อดิน (textural class name) โดยใช้ไดอะแกรมสามเหลี่ยม ดังภาพที่ 3 หรือวิธีที่ง่ายที่สุดคือ แบ่งประเภทเนื้อดินออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้คือ กลุ่มทราย (sand) ( $\geq 70\%$  ทราย  $\leq 15\%$  ดินเหนียว) กลุ่มทรายแป้ง (silt) ( $\geq 80\%$  ทรายแป้ง  $\leq 12\%$  ดินเหนียว) กลุ่มดินเหนียว (clay) ( $\geq 50\%$  ดินเหนียว) และกลุ่ม loams (กลุ่มขนาดอนุภาคที่นอกเหนือจากสามกลุ่มข้างต้น) (Boyd, 1995) แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 3 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมสำหรับพิจารณาประเภทเนื้อดิน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Boyd (1995)

## ตารางที่ 1 การจัดกลุ่มขนาดอนุภาคดินตะกอน

ชื่อกลุ่มขนาด	ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)		
	USUD <sup>1</sup>	ISSS <sup>1</sup>	Wentworth <sup>2</sup>
กรวด (gravel)	2-64	>2	>2
ทรายหยาบมาก (very coarse sand)	1-2		1-2
ทรายหยาบ (medium sand)	0.5-1	0.2-2	0.5-1
ทรายปานกลาง (medium sand)	0.25-0.5		0.25-0.5
ทรายละเอียด (fine sand)	0.1-0.25	0.02-0.2	0.125-0.25
ทรายละเอียดมาก (very fine sand)	0.05-0.1		0.063-0.125
ทรายแป้ง (silt)	0.002-0.05	0.002-0.02	0.004-0.062
ดินเหนียว (clay)	<0.002	<0.002	0.00024-0.004

หมายเหตุ USDA = United States Department of Agriculture

ISSS = International Society of soil Science

ที่มา: <sup>1</sup> Boyd (1995)

<sup>2</sup> Bartram and Balance (1996)

### 2.4 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณอินทรีย์วัตถุและการสะสมนิเวศโคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน เพราะปริมาณอินทรีย์วัตถุมีผลต่อกระบวนการยึดติดและการตรึงนิเวศโคลด์กัมมันตรังสีของดินตะกอน (Ligero *et al.*, 2001) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบความหมายรวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

อินทรีย์วัตถุ (organic matter) หมายถึง อินทรีย์สารทุกชนิดที่มีอยู่ในดิน ซึ่งได้จากซากพืช ซากสัตว์ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในดิน รวมถึงอินทรีย์สารที่รากพืชปลดปล่อยออกมาและที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

อินทรีย์วัตถุในดินตะกอนประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิดซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันอย่างมาก และไม่สามารถใช้สารสกัดชนิดหนึ่งชนิดใดสกัดอินทรีย์วัตถุออกจากดินตะกอนได้ทั้งหมดโดยไม่เปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่เดิม โดยเมื่อพิจารณา

องค์ประกอบที่สำคัญของอินทรีย์วัตถุพบว่ามีธาตุคาร์บอนเป็น โครงสร้างมากที่สุดและอยู่ในสภาพที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนจึงสามารถหาได้ทางอ้อมจากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในอินทรีย์วัตถุ (พัชรี, 2550) เพราะคาร์บอนอินทรีย์เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนประมาณร้อยละ 48-58 ดังนั้นจึงเป็นตัวชี้วัดที่ดีถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุได้ การวัดปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การวัดน้ำหนักดินตะกอนที่หายไป หลังจากการทำปฏิกิริยาด้วยความร้อนหรือสารเคมีเข้มข้นเพื่อกำจัดอินทรีย์วัตถุและวัดปริมาณคาร์บอนในดินตะกอน หรือการวัดคาร์บอนอินทรีย์โดยการใช้ความร้อนอาจทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน (carbon, hydrogen and nitrogen analyzer, CHN) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง (800-1,000 องศาเซลเซียส) เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และวัดด้วยเครื่องตรวจวัด IR (infra-red gas detector) หรือ GC (gas chromatograph) และการวัดคาร์บอนอินทรีย์โดยให้ความร้อนอีกวิธีหนึ่งคือวิธีการหาจากน้ำหนักที่หายไป (mass loss on ignition) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียสแล้วหาน้ำหนักที่หายไปซึ่งจะเท่ากับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Combs and Nathan, 1998) แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะต้องรักษาอุณหภูมิที่ใช้ให้ต่ำกว่า 440 องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยงการทำลายอนินทรีย์คาร์บอนเนต ซึ่งอาจมีในตัวอย่าง อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงการสูญเสียโครงสร้างน้ำของอนุภาคดินเหนียว เพราะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น การประเมินปริมาณอินทรีย์วัตถุจะมากขึ้นไป (Schumacher, 2002)

## ตารางที่ 2 การประเมินปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน

ระดับอินทรีย์วัตถุ	อินทรีย์วัตถุ (กรัมต่อกิโลกรัม)	อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)
ต่ำมาก	น้อยกว่า 5	น้อยกว่า 0.5
ต่ำ	5-10	0.5-1.0
ค่อนข้างต่ำ	10-15	1.0-1.5
ปานกลาง	15-25	1.5-2.5
ค่อนข้างสูง	25-35	2.5-3.5
สูง	35-45	3.5-4.5
สูงมาก	มากกว่า 45	มากกว่า 4.5

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2515)

## 2.5 การวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอนและในสัตว์หน้าดิน

โลหะหนักคือกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป และเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มทรานสิชัน ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ธาตุโลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการธรรมชาติ จึงทำให้มีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ และก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งระดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของโลหะหนักแต่ละชนิด (วิระวงศ์, 2543) สารมลพิษจากโลหะหนักมีทั้งที่เกิดขึ้นได้เองโดยธรรมชาติ เช่น จากการผุกร่อนของหิน การพังทลายของดินและเกลือที่ไม่ละลาย (Zhong *et al.*, 2006) และจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งโลหะหนักที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้นมีปริมาณน้อยมาก ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่กำลังดำเนินไปอย่างไม่หยุดยั้งก่อให้เกิดมลพิษมากมาย ทำให้มีอัตราการถ่ายเทของโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้นและเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะไปสะสมอยู่ในน้ำ ดินตะกอน พืช และสัตว์น้ำ มีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และมีปริมาณสูงขึ้นตามห่วงโซ่อาหาร (สุรินทร, ม.ป.ป)

สำหรับโลหะหนักในดินตะกอนทะเลมีต้นกำเนิดทั้งจากธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยโลหะหนักเหล่านี้เมื่อลงสู่ทะเล ส่วนหนึ่งจะยังคงละลายอยู่ในน้ำและอีกส่วนหนึ่งสะสมอยู่ในชั้นบางๆ ที่ผิวหน้าหรือถูกดูดซับบนสารแขวนลอย แล้วค่อยๆ ตกตะกอนออกจากน้ำไปสู่เบื้องล่าง และจะกลับคืนสู่น้ำได้อีกโดยกระบวนการทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ดังนั้นดินตะกอนจึงทำหน้าที่เหมือนบัฟเฟอร์และสะสมโลหะหนักไว้ได้นานแม้ว่าการปล่อยโลหะหนักลงสู่ทะเลได้หยุดลงแล้ว (สรัญญา, 2544) การกระจายและการสะสมได้รับอิทธิพลจากลักษณะเนื้อดินตะกอน องค์ประกอบที่เป็นแร่ สถานะออกซิเดชัน-รีดักชัน การดูดซับ-การคายออก และการขนส่งทางกายภาพ (Buccolieri *et al.*, 2006) โดยโลหะหนักที่สะสมในดินตะกอนมาจากโลหะหนักที่อยู่ในน้ำ ผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ การเกิดตะกอนเชิงซ้อน และอื่นๆ และเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง เช่น ความเค็ม ค่าความเป็นกรด ปฏิกริยารีดอกซ์ ทำให้โลหะหนักที่สะสมในดินตะกอนถูกปลดปล่อยสู่น้ำทะเลและนำไปสู่การเกิดมลพิษแบบทุติยภูมิ (Zhong *et al.*, 2006)

มนูวดี (2532) อธิบายการปนเปื้อนของโลหะหนักว่า ถูกพาลงสู่ทะเลโดยกระบวนการทางธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ผ่านทางแม่น้ำ การชะล้างพื้นดิน การทิ้งของ

เลียและผ่านทางอากาศ โลหะหนักจะจมตัวจากอากาศลงสู่ผิวน้ำทะเลด้วยกระบวนการจมตัวแบบเปียกและแบบแห้ง การผุพังกัดกร่อนของหินและการละลายออกมาจากตะกอนในทะเล ธาตุส่วนใหญ่จะลงสู่ทะเลโดยผ่านทางแม่น้ำ แต่บางธาตุ เช่น พรอทและตะกั่วลงสู่ทะเลโดยผ่านทางอากาศ โลหะหนักชนิดต่างๆ ที่ถูกพาลงสู่ทะเลนั้นจะคงรูปอยู่ตามแบบคือ อยู่ในสิ่งมีชีวิต ละลายอยู่ในน้ำทะเลและติดอยู่กับวัตถุแขวนลอย ในเวลาต่อมาก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เช่น อาจตกตะกอนลงสู่พื้นท้องทะเลหรืออาจถูกปล่อยจากน้ำทะเลสู่บรรยากาศ

ด้วยเหตุผลที่โลหะหนักสามารถอยู่คงทนได้ในสิ่งแวดล้อม จึงก่อให้เกิดความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาและวัฏจักรชีวธรณีเคมี และดินตะกอนทางทะเลเปรียบได้เสมือนเป็นอ่างเก็บน้ำที่คั่งที่สุดสำหรับการสะสมโลหะหนักในสภาพแวดล้อมบริเวณชายฝั่ง (Zhou *et al.*, 2007) โลหะหนักจะมีส่วนเกี่ยวข้องในกลไกทางชีวธรณีเคมีต่างๆ สามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศผ่านทางกระบวนการการสะสมและการเพิ่มขนาดทางชีวภาพ และอาจเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและการดำรงชีวิตของมนุษย์ (Buccolieri *et al.*, 2006)

## 2.6 การวิเคราะห์ชนิดของสัตว์หน้าดินที่อยู่ในดินตะกอน

สัตว์หน้าดินเป็นสัตว์กลุ่มหนึ่งที่พบบริเวณพื้นดินชายฝั่งทะเล โดยอาศัยอยู่ทั้งบริเวณผิวดินและขุดรูอยู่ในดิน ประกอบด้วยสัตว์หลายชนิดหลายกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทั้งขนาดตัว พฤติกรรมการกิน อาหาร และลักษณะที่อยู่อาศัย จึงมีการแบ่งสัตว์หน้าดินออกเป็น 3 กลุ่ม ตามขนาดตัว ได้แก่ สัตว์หน้าดินขนาดใหญ่ (macrofauna) มีขนาดตั้งแต่ 500 ไมโครเมตรขึ้นไป ถัดมาเป็นสัตว์หน้าดินขนาดกลาง (meiofauna) มีขนาดโดยประมาณอยู่ในช่วง 45-500 ไมโครเมตร และสัตว์หน้าดินขนาดเล็ก (microfauna) มีขนาดต่ำกว่า 42 ไมโครเมตร (1 มิลลิเมตร = 1,000 ไมโครเมตร) นอกจากการแบ่งตามความแตกต่างของขนาดตัวแล้วยังสามารถจัดกลุ่มตามพฤติกรรมการกินอาหารได้เป็น 3 กลุ่ม คือ พวกที่กินอาหารโดยการกรองอนุภาคจากมวลน้ำ (filter feeder) ได้แก่ หอยและไส้เดือนทะเลบางชนิด พวกที่กินซากตะกอนต่างๆ (deposit feeder) ได้แก่ ครัสเตเชียนหลายชนิด (แอมฟิพอด ทาเนาเซีย อไอโซพอด) ไส้เดือนทะเลหลายชนิดและหอยบางชนิด และพวกที่กินสัตว์อื่นเป็นอาหาร (carnivore หรือ scavenger) ได้แก่ ปูและไส้เดือนทะเลหลายชนิด เป็นต้น สัตว์หน้าดินมีบทบาทสำคัญในการถ่ายทอดพลังงานในระบบห่วงโซ่อาหารของระบบนิเวศชายฝั่ง โดยการเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เช่น ปู กุ้ง และปลาหน้าดินหลายชนิด สัตว์หน้าดินนอกจากเป็นสิ่งซึ่งถึงความอุดมสมบูรณ์สำหรับปลาและสัตว์น้ำที่อาศัยในบริเวณนั้นยังสามารถใช้เป็นดัชนีชี้คุณภาพของแหล่งน้ำได้ เนื่องจาก

สัตว์หน้าดินบางกลุ่มมีความทนทานต่อสภาวะมลพิษ โดยเฉพาะสภาพปริมาณอินทรีย์สารสูงทั้งในน้ำและดินตะกอน ได้แก่ไส้เดือนทะเล หอยสองฝา และครัสเตเชียนบางชนิด (ชุตินา และจรมัน, 2531; เริงชัย, 2538; ชุตินา, 2540; ฌิฏฐารัตน์ และคณะ, 2542) นอกจากนี้สัตว์หน้าดินยังมีบทบาทสำคัญด้านการเป็นแหล่งอาหารของสัตว์น้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกกลุ่มปลาหน้าดิน กุ้ง และปู ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ (จำลอง, 2546)

### 3. ระบบวัดรังสีแกมมา

ในการตรวจวัดรังสีจะอาศัยคุณสมบัติการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัตถุที่อยู่ในหัววัดรังสี ผลที่เกิดขึ้นคืออะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้น (excitation) หัววัดรังสีที่ใช้หลักการแตกตัวเป็นไอออน ได้แก่ หัววัดแบบก๊าซทุกชนิดและหัววัดแบบกึ่งตัวนำ ส่วนหัววัดรังสีที่ใช้หลักการกระตุ้น ได้แก่ หัววัดแบบซินทิลเลชัน (scintillation detector) สัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสีจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

#### 3.1 องค์ประกอบของระบบวัดรังสีโดยทั่วไป

##### 3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง (high voltage power supply)

ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถปรับค่าได้และมีเสถียรภาพในการรักษาระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้าทางออก (output) ให้คงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อมหรือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า สำหรับหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถปรับค่าได้จาก 0-5,000 โวลต์ และให้กระแสได้ 0-100 แอมแปร์

##### 3.1.2 ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier)

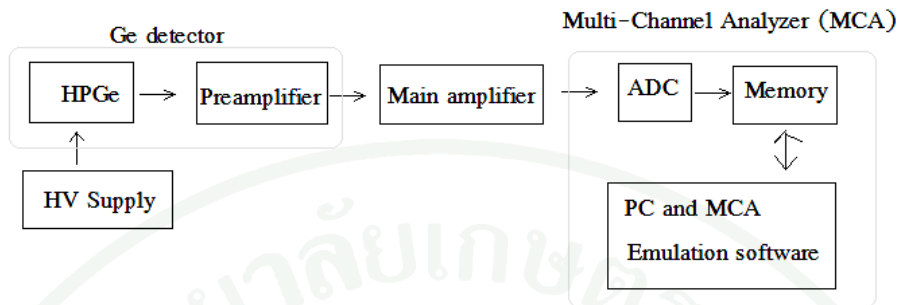
แบบที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบที่เรียกว่า charge sensitive preamplifier ซึ่งจะทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสี แล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) ซึ่งมีขนาดที่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนประจุ

### 3.1.3 ภาคขยายหลัก (amplifier)

เป็นส่วนที่รับสัญญาณพัลส์จากภาคขยายส่วนหน้า แล้วนำมาปรับแต่งรูปของสัญญาณ พร้อมกับขยายขนาดของสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ความสูง ขนาดของการขยายสัญญาณ (voltage gain) สามารถปรับได้ในช่วงกว้างด้วยการปรับหยวนๆเป็นขั้น และมีการปรับละเอียด เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสูงของสัญญาณให้เป็น unipolar และ bipolar รูปร่างของสัญญาณทั้งสองนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่า shaping time constant

### 3.1.4 วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์ (pulse height analyzer, PHA)

ในกรณีที่ต้องการทราบสเปกตรัมของรังสีจะต้องใช้วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์ โดยแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ ประเภทแรกวงจรวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดี่ยว (single channel analyzer, SCA) ประกอบด้วย upper level discriminator, ULD และ lower level discriminator, LLD การแยกระดับความสูงของพัลส์อาศัยการเปรียบเทียบความสูงของสัญญาณกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ถูกจัดเก็บเอาไว้ด้วย LLD และ ULD ประเภทที่สองคือเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (multichannel analyzer, MCA) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนนับของรังสีระดับพลังงานต่างๆ ซึ่งตกกระทบหัววัดได้อย่างอัตโนมัติ เมื่อมีสัญญาณทางเข้าส่งมาที่ส่วนแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter, ADC) ความสูงของสัญญาณจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งจะเป็นตัวระบุตำแหน่ง (address) การเก็บข้อมูลในหน่วยความจำ สัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปยัง channel address register ซึ่งจะทำหน้าที่เลือกแอดเดรสหรือตำแหน่งในหน่วยความจำที่ได้รับมา เพื่อให้ภาคบันทึกข้อมูล (data register) ทำการบันทึกจำนวนครั้งของสัญญาณที่เกิดขึ้นครั้งละ 1 หน่วยนับ โดยบวกเข้ากับข้อมูลที่มีอยู่ในหน่วยความจำ และจะถูกส่งออกไปแสดงผลบนจอภาพ (Knoll, 2000)



ภาพที่ 4 แผนผังระบบการวัดรังสีแกมมา

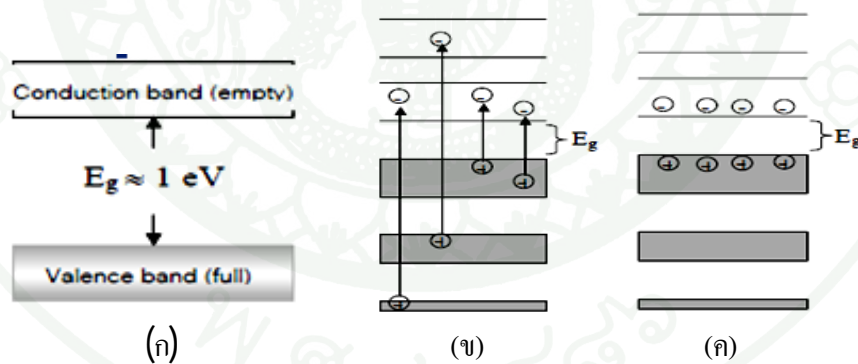
ที่มา: นิคม (2551)

3.2 ลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากหัววัดที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงควรรู้ลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้เข้าใจการทำงานของหัววัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 สภาพการนำหมายถึง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยของแข็ง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ ในตัวนำ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ ง่ายอย่างอิสระ ณ ความต่างศักย์ใดๆ ที่มากกว่าศูนย์ ในฉนวน อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ภายใต้ ความต่างศักย์ใดๆ (ยกเว้นเมื่อความต่างศักย์สูงมากจนเกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า) นั่นคือกระแสเป็น ศูนย์ในทุกๆ อุณหภูมิ และในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (ใกล้ อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์) ภายใต้ความต่างศักย์ใดๆ เมื่ออุณหภูมิสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอน สามารถเคลื่อนที่และกระแสไฟฟ้าจะไหล ณ ความต่างศักย์ปานกลาง

3.2.2 สารกึ่งตัวนำ ในสารกึ่งตัวนำแถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและแถบ การนำจะไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ แต่ช่องว่างพลังงานระหว่างสองแถบนี้แคบมากเมื่อเทียบกับ ฉนวน เมื่ออุณหภูมิต่ำใกล้ศูนย์ สภาพการนำของสารกึ่งตัวนำจะเป็นศูนย์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในแถบการนำและมีสภาพการนำเพิ่มขึ้น โดยอิเล็กตรอนบางตัวได้รับ พลังงานเพียงพอที่จะข้ามไปสู่แถบการนำได้ซึ่งจะเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า เมื่อ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ สถานะว่างเปล่าจะเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) เป็นช่องว่างของอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทิศทางใดก็ตาม โฮลจะเคลื่อนที่ไปใน

ทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น โสลเปรียบเสมือนอนุภาคที่มีประจุเป็นบวก ในสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์และเป็นกลางทางไฟฟ้าจำนวนของอิเล็กตรอนจะเท่ากับ โสลเสมอ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่ใช่วิธีเดียวที่จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน การดูดกลืนของรังสีหรือการชนกับอนุภาคที่มีประจุอาจทำให้เกิดผลแบบเดียวกันได้ พลังงานของอนุภาคที่มีประจุเมื่อตกกระทบกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำจะช่วยยกระดับของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ นอกจากนี้ยังทำให้อิเล็กตรอนจากแถบที่ว่างตัวอยู่เล็กๆ เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ (Knoll, 2000) ดังแสดงในภาพที่ 5 อิเล็กตรอนปรากฏขึ้นในแถบที่เดิมเคยว่างเปล่าและ โสลปรากฏขึ้นในแถบที่เดิมถูกบรรจุเต็ม การจัดวางนี้จะเกิดในช่วงเวลาประมาณ 10-12 วินาที อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและ โสลทำให้อิเล็กตรอนกระจุกแน่นอยู่ในแถบการนำต่ำสุด ในอีกทางหนึ่ง โสลจะกระจุกแน่นใกล้กับส่วนบนของแถบวาเลนซ์ ในระหว่างกระบวนการลดสถานะกระตุ้นจะมีอิเล็กตรอนและ โสลเกิดขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกระบวนการหลายขั้นตอนพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะมากกว่าช่องว่างพลังงาน  $E_g$  ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนและ โฮลก็คงอยู่ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการลดการกระตุ้น คือการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและ โฮลและเป็นการกลับสู่สภาวะเป็นกลางของผลึกอีกครั้งหนึ่ง (ธิดารัตน์, 2548)

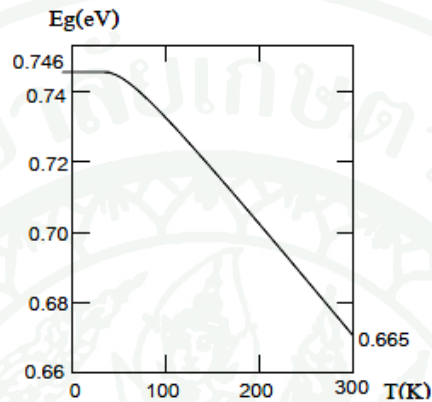


ภาพที่ 5 แถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำ (ก) เมื่อรังสีชนกับอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงพอที่จะขึ้นไปสู่แถบการนำ (ข) หลังจากเวลา 10-12 วินาที (ค)

ที่มา: Claudio and Annalisa (1980)

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงช่องว่างพลังงาน (Energy Gap;  $E_g$ ) กับอุณหภูมิ ภาพที่ 5 เป็นค่าที่ไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 6 สำหรับสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมค่าของ  $E_g$  จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิลดลงแต่ที่อุณหภูมิต่ำมากค่าของ  $E_g$  จะมี

ค่าคงที่ (Claudio and Annalisa, 1980) ดังนั้นในหัววัดสารกึ่งตัวนำบางชนิดจึงมีการหล่อเย็นเพื่อทำให้อุณหภูมิของหัววัดมีค่าต่ำ



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของช่องว่างพลังงานกับอุณหภูมิ

ที่มา: Claudio and Annalisa (1980)

3.2.4 หน้าที่ของสิ่งเจือปนในสารกึ่งตัวนำ สมบัติของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะเปลี่ยนแปลงถ้าเติมสิ่งเจือปนเข้าไป สถานะใหม่จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ คือมีอิเล็กตรอนหรือโฮลส่วนเกินซึ่งช่วยเพิ่มสภาพการนำของวัสดุ การควบคุมปริมาณสิ่งเจือปนนั้นเรียกว่า การโด๊ป (dope) ถ้าอะตอมสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำเป็นอะตอมผู้ให้ซึ่งทำให้เกิดสถานะผู้ให้ (donor) ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากและมีโฮลจำนวนน้อย ซึ่งสภาพการนำจะขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอน และเรียกสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ถ้าอะตอมสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำเป็นอะตอมผู้รับซึ่งทำให้เกิดสถานะผู้รับ (acceptor) ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีโฮลเป็นจำนวนมาก เรียกสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) สำหรับทุกอะตอมของสิ่งแปลกปลอมแบบเอ็นและพี อิเล็กตรอนและโฮลจะอยู่ที่สถานะผู้ให้และสถานะผู้รับตามลำดับ วัสดุดังกล่าวยังคงเป็นกลาง แต่เมื่อสภาพการนำปรากฏอิเล็กตรอนจะเป็นพาหะหลักของแบบเอ็น โฮลจะเป็นพาหะหลักสำหรับแบบพี เนื่องจากการเติมสิ่งแปลกปลอมทำให้เกิดสถานะใหม่ เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะและสภาพการนำของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสิ่งแปลกปลอม ช่องว่างพลังงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและขึ้นอยู่กับจำนวนของสิ่งแปลกปลอมและความบกพร่องของผลึก (Young, 2003)

3.2.5 รอยต่อ พี-เอ็น (p-n junction) เมื่อนำผลึกสารกึ่งตัวนำแบบพีที่มีโฮล ส่วนเกินมาต่อกับผลึกแบบเอ็นจะกลายเป็นผลึกชนิดพี-เอ็น ที่บริเวณรอยต่อนั้นอิเล็กตรอนของผลึกแบบเอ็นจะรวมกับโฮลของผลึกแบบพี เกิดเป็นบริเวณที่เป็นกลางที่เรียกว่า ช่วงดีพลีทชัน (depletion zone) ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าหรือการไบอัส (bias) กับผลึกที่มีการเชื่อมต่อนี้ โดยให้ขั้วบวกกับผลึกแบบพีและให้ขั้วลบกับผลึกแบบเอ็นเรียกว่า การให้ไบอัสทางตรง (forward bias) โฮลจากผลึกแบบพีจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ และอิเล็กตรอนจากผลึกแบบเอ็น จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลช่วงดีพลีทชันชั้นจะแคบลง ถ้าต่อขั้วลบกับผลึกแบบพีและต่อขั้วบวกกับผลึกแบบเอ็น จะเรียกว่าการให้ไบอัสกลับทาง (reverse bias) โฮลจากผลึกแบบพีจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจากผลึกแบบเอ็นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้ช่วงดีพลีทชันกว้างขึ้น เมื่อรังสีเข้ามาในช่วงดีพลีทชันจะเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น ทำให้เกิดการไหลของกระแส (ชิตาร์ตัน, 2548)

### 3.3. หัววัดรังสี

หัววัดรังสีที่ใช้ในการทดลอง คือ หัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium Detector, HPGe) รูปแบบของหัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูงที่มีอยู่ทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ เพลนนา (planar) และ โคแอกเซียล (coaxial)

#### 3.3.1 รูปแบบของหัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง

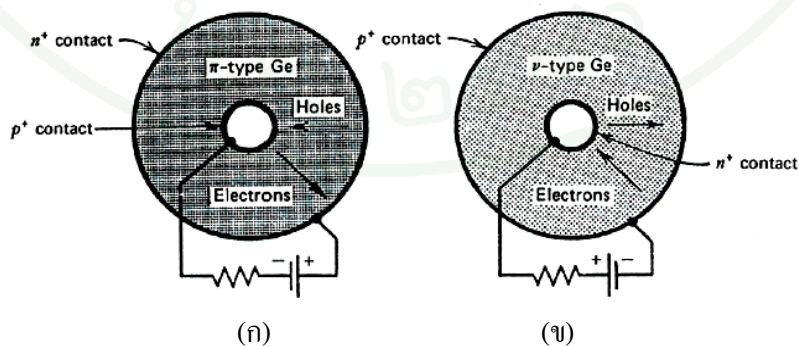
1. แบบเพลนนา (planar) มีพื้นที่หน้าตัดกว้าง มีความหนาประมาณ 5-15 มิลลิเมตร หน้าต่างมักทำจากโบรอนที่มีความหนาประมาณ 0.3 ไมโครเมตร โครงสร้างของหัววัดจะต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน บริเวณหน้าสัมผัสเอ็น เกิดจากการระเหยและแพร่ลิเทียมที่บริเวณด้านบนเป็นผิวบางๆ หรืออาจสอดแทรกอะตอมผู้ให้เข้าไปโดยตรง โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค ส่วนบริเวณหน้าสัมผัสพี เกิดจากการสอดแทรกอะตอมผู้รับ นั่นคือจะด้บริเวณทำลายลึกของหัววัดเป็นบริเวณระหว่างผิวหน้าสัมผัสเอ็นและพีซึ่งอยู่ตรงข้ามกัน ดังภาพที่ 7 หัววัดเจอร์เมเนียมจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน โดยปกติอุณหภูมิดังกล่าวอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้ถ้าสนามไฟฟ้ามีความเข้มข้นที่สุดประมาณ  $10^5$  โวลต์ต่อเมตร เหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) (ชิตาร์ตัน, 2548)



ภาพที่ 7 โครงสร้างของหัววัด HPGe แบบเพลนนา

ที่มา: ธิดารัตน์ (2548)

2. แบบโคแอกเซียล (coaxial) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกและมีช่องโหว่ตรงกลาง โดยมีขั้วไฟฟ้าขั้วที่หนึ่งอยู่ที่ด้านนอกผิวสัมผัสของผลึก ขั้วที่สองอยู่บริเวณผิวในช่องโหว่ตรงกลางกระบอก หัววัดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (n-type HPGe coaxial detector) หน้าต่างมักเป็นโบรอน เมื่อรังสีผ่านเข้ามาจะเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล ซึ่งโฮลจะถูกจับไว้ทันที ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปในผลึกจนกระทั่งถูกจับไว้ในแกนด้านใน เหมาะสำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงาน 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ถึง 10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับหัววัดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบพี (p-type HPGe coaxial detector) ด้านนอกของหัววัดจะต่อเข้ากับขั้วบวก ด้านหน้าเป็นหน้าต่างทำจากลิเทียมหนาประมาณ 600 ไมโครเมตร สามารถวัดรังสีเอกซ์พลังงานสูงถึง 25 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ถึง 10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ (Knoll, 2000) ภาควัดขวางของหัววัดแบบโคแอกเซียลแสดงในภาพที่ 8



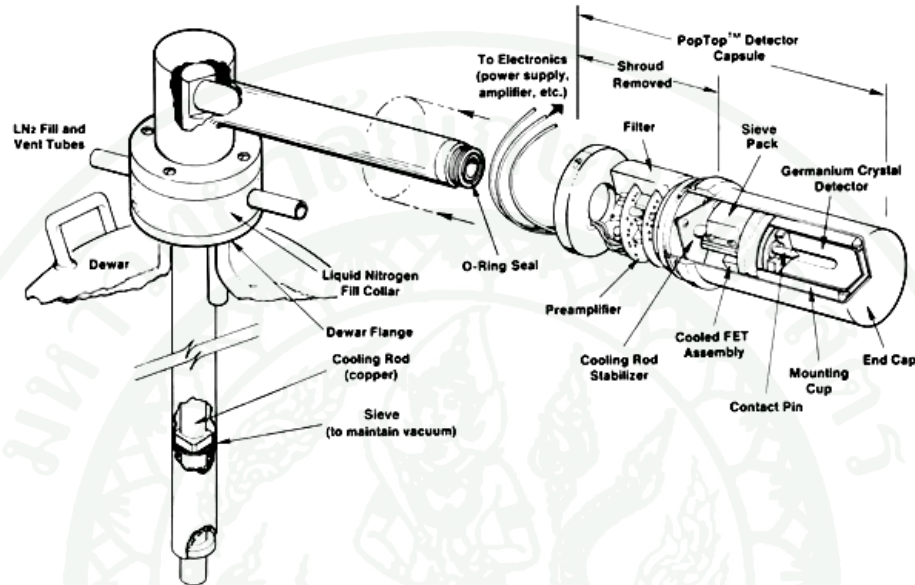
ภาพที่ 8 ภาควัดขวางของหัววัดรังสี HPGe แบบโคแอกเซียล ชนิดพี (ก) ชนิดเอ็น (ข)

ที่มา: Knoll (2000)

ส่วนประกอบของระบบวัดเจอร์เมเนียมอย่างละเอียดแสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. Pop top detector capsule บรรจุด้วยผลึกของหัววัดเจอร์เมเนียม วงจรภาคขยาย ส่วนหน้า และ HV filter
2. End Cap ทำจากเบรลิลเลียมหรือเส้นใยคาร์บอน เป็นหน้าตาสำหรับรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ ภายในจะเป็นสุญญากาศซึ่งมีผลึกเจอร์เมเนียมบรรจุอยู่
3. Mounting cup ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง ทำหน้าที่ในการค้ำผลึกเจอร์เมเนียม
4. Germanium detector element คือผลึกเดี่ยวเจอร์เมเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง อาจจะเป็นผลึกชนิดเอ็นหรือพีก็ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและการประยุกต์ใช้งาน
5. Contact ping คือเข็มที่สัมผัสกับหัววัด ทำจากสแตนเลส มีหน้าที่ทำให้อุณหภูมิของหัววัดอยู่ในสภาวะเหมาะสมกับการวัด
6. Cooling rod stabilizer ทำจากวัสดุที่เป็นทองแดงใช้ในการหล่อเย็น
7. Sieve pack ทำด้วยวัสดุที่เป็นตะกั่วบริสุทธิ์ เป็นเกราะป้องกันหัววัด
8. Preamplifier วงจรภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณที่รับมาจากหัววัด ต้องอยู่ใกล้กับหัววัดเพื่อลดสัญญาณรบกวนต่างๆ
9. HV filter (with Al shroud) ปกคลุมด้วยอลูมิเนียม
10. LN<sub>2</sub> fill vent tubes เป็นท่อเติมไนโตรเจนเหลวและท่อระบายอากาศ
11. Dewar ทำจากซีโอไลต์
12. Dewar flange เป็นขอบบนของ Dewar

### 13. Cooling rod ทำจากทองแดงมีหน้าที่เป็นแท่งหล่อเย็น (EG&G ORTEC, 2001)



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบโดยละเอียดของระบบวัด HPGe

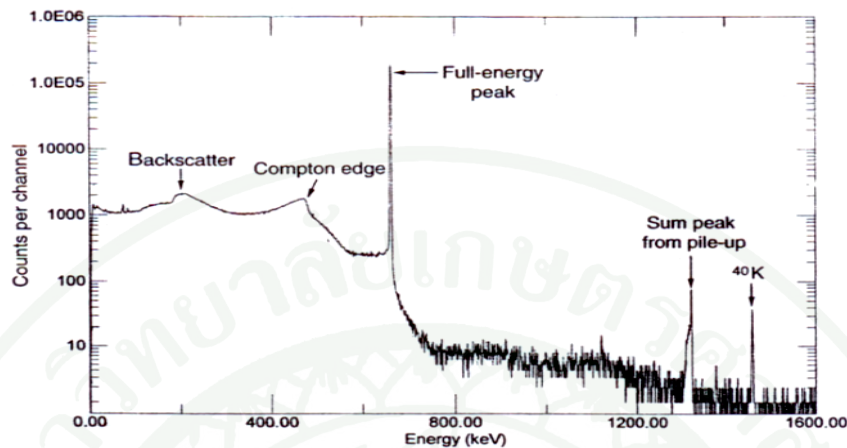
ที่มา: EG&G ORTEC (2001)

#### 3.3.2. คุณสมบัติของหัววัดรังสี

การวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ มีผลการวัดเป็นแถบของค่านับวัดของรังสีแต่ละพลังงาน เรียกว่า สเปกตรัมของรังสีแกมมา ดังภาพที่ 10 รังสีแต่ละพลังงานบนสเปกตรัม เรียกว่า โฟโตพีค (photo peak) โดยค่านับวัด (count) ของรังสีคำนวณจากพื้นที่ของโฟโตพีคตามสมการที่ (1)

$$\text{peak area} = \sum_{i=a}^b C_i - \left( \frac{C_a + C_b}{2} \right) (b-a+1) \quad (1)$$

- เมื่อ  $C_i$  = ค่านับวัดที่แต่ละตำแหน่งบนโฟโตพีค  
 $C_a, C_b$  = ค่านับวัดที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของโฟโตพีค  
 $a, b$  = หมายเลขช่อง (channel number) ของตำแหน่งเริ่มต้นและสุดท้ายของโฟโตพีค



ภาพที่ 10 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการวัดด้วยหัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ

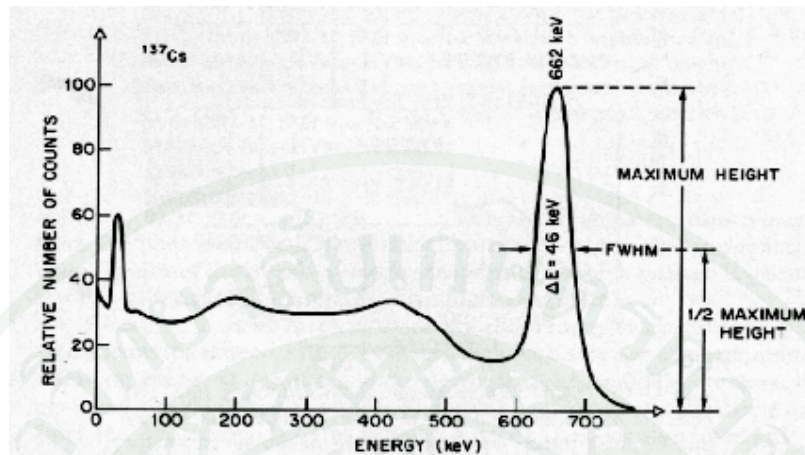
ที่มา: Knoll (2000)

การตรวจวัดปริมาณรังสีจะต้องทำการปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสี (energy calibration) โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่เครื่องมือวัดได้กับค่ามาตรฐาน เนื่องจากภาคขยายส่วนหน้าสามารถปรับกำลังขยายได้ ทำให้สัญญาณขาออกที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไป เช่นเดียวกับตำแหน่งของพีคบนจอภาพ ดังนั้นการจะทำให้ระบบวัดสามารถวัดพลังงานของสเปกตรัมได้ถูกต้องจำเป็นต้องปรับเทียบค่าพลังงานของสเปกตรัมให้ตรงกับช่องสัญญาณของ MCA ก่อน

1. ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (Full Width at Half Maximum; FWHM) สามารถหาได้โดยวัดค่านับวัดสูงสุดที่ยอดของโฟโตพีค และอ่านค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนี้ จากนั้นหาค่าตำแหน่งของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัดของยอดโฟโตพีค จะได้พลังงาน 2 ค่าคือ ค่าที่อยู่ด้านซ้ายและด้านขวาของโฟโตพีค และจะได้ค่าความแตกต่างของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่ง ( $\Delta E$ ) (Gilmore and Hemingway, 2004) ดังภาพที่ 11 สามารถคำนวณค่า FWHM ได้จากสมการที่ (2)

$$\text{FWHM} = \Delta E \quad (2)$$

เมื่อ  $\Delta E$  = ค่าความแตกต่างของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของโฟโตพีค (กิโลอิเล็กตรอน โวลต์)



ภาพที่ 11 การหาค่า FWHM ของซีเซียม-137 ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

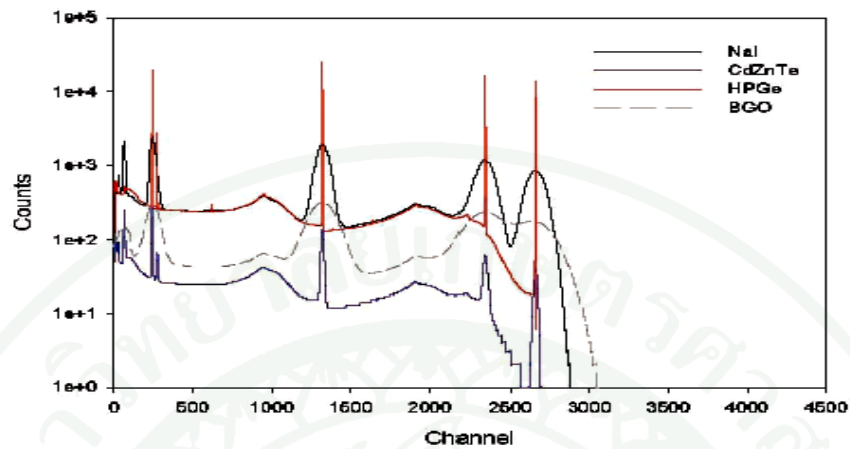
ที่มา: Lewellen (2008)

2. ความสามารถในการแยกแยะพลังงาน (energy resolution) เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการแยกแยะรังสีที่มีพลังงานใกล้เคียงกันออกจากกัน คำนวณจากค่า FWHM (Ahmet, 2008) ตามสมการที่ (3)

$$\text{Resolution (\%)} = \frac{\text{FWHM}}{E} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ FWHM = ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (กิโลอิเล็กตรอนโวลต์)  
E = พลังงานของรังสีแกมมา (กิโลอิเล็กตรอนโวลต์)

การใช้หัววัด HPGe จะใช้สำหรับวัดไอโซโทปที่มีพลังงานระหว่าง 50 - 3,000 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ สำหรับไอโซโทปที่มีพลังงานต่ำกว่านั้น หัววัด HPGe พลังงานต่ำอาจจะขยายช่วงพลังงานลงไปได้ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (IAEA, 2010) และหัววัด HPGe ยังเป็นหัววัดที่มีความสามารถแยกแยะพลังงานได้ดีกว่าหัววัดชนิดอื่นๆ ดังภาพที่ 12



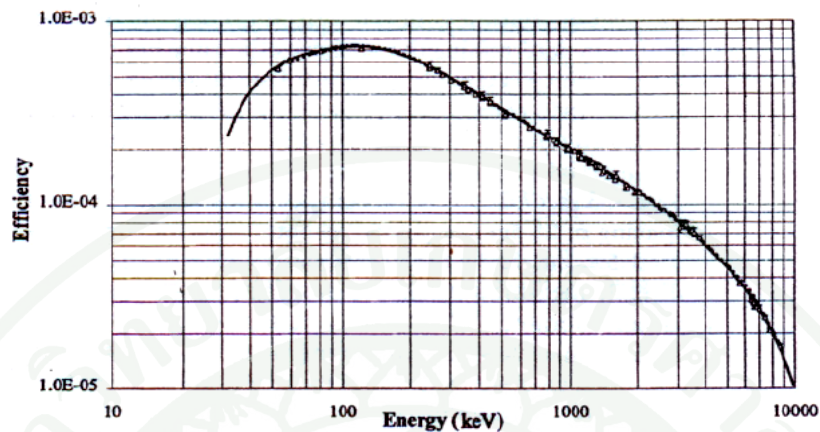
ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบความสามารถในการแยกแยะพลังงานของหัววัดรังสีชนิดต่างๆ

ที่มา: IAEA (2010)

3. ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (detector efficiency) เป็นสัดส่วนของค่านับวัดรังสีแกมมาบนพื้นที่ของโฟโตพีคต่อค่ากัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสีที่ทำการวัด ประสิทธิภาพของหัววัดมีค่าแตกต่างกันสำหรับรังสีแต่ละพลังงานและระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัด เมื่อวัดรังสีที่มีพลังงานสูงขึ้นประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง (Ahmet, 2008) ดังภาพที่ 13 โดยคำนวณประสิทธิภาพของหัววัดได้จากสมการที่ (4)

$$\varepsilon = \frac{(N/t)}{(aAf_c)} \times 100 \quad (4)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  = ค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่พลังงานนั้นๆ (ร้อยละ)  
 $N$  = ค่านับวัดสุทธิของพีคที่พลังงานนั้นๆ  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการนับวัด (วินาที)  
 $a$  = ค่า gamma emission ratio  
 $A$  = ค่ากัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี (เบคเคอเรล)  
 $f_c$  = ค่า correction factors สำหรับ self absorption และอื่นๆ



ภาพที่ 13 ประสิทธิภาพของหัววัดเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้น

ที่มา: Knoll (2000)

#### 4. ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดรังสี (Lower Limit of Detection, LLD)

เป็นคำที่อธิบายถึงความสามารถในการวัดของระบบภายใต้เงื่อนไขที่มีอยู่ขณะวัด การประมาณค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่ระบบสามารถวัดได้ของนิวไคลด์ที่สลายตัวให้รังสีแกมมา ณ เวลานั้นวัดนั้นคำนวณได้จากหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และเป็นที่ยอมรับคือ การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดรังสีโดยคิดค่าความเสี่ยง (risk) ร้อยละ 5 มีค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากสมการที่ (5)

$$LLD = \frac{4.66 S_n}{\epsilon P_\gamma} \quad (5)$$

เมื่อ  $S_n$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่านับวัดสุทธิ (net count rate) =  $\sqrt{(S_T^2 + S_B^2)}$

$\epsilon$  = ประสิทธิภาพของระบบที่ค่าพลังงานต่างๆ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1

$P_\gamma$  = ค่าความน่าจะเป็นสัมบูรณ์ในการสลายตัวและให้รังสีแกมมาของธาตุกัมมันตรังสีมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1

หมายเหตุ  $S_T$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับวัดรวม =  $\sqrt{(R_T/t)}$

$S_B$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับวัดรังสีพื้นหลัง =  $\sqrt{(R_B/t)}$

$t$  = เวลานั้นวัด (วินาที)

ค่า LLD ในสมการที่ (5) แสดงให้เห็นถึงการคำนวณค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่ระบบสามารถวัดได้จากการวัดรังสีแกมมาที่แผ่ออกมาโดยไม่มีการรบกวนจากลักษณะของตัวอย่างที่ทำการวัด โดยคิดจากอัตราการนับวัดได้ของแต่ละพลังงานที่ทำการนับค่ารังสีพื้นหลังไว้แล้ว เมื่อทำการนับวัดรังสีแกมมาในตัวอย่าง ค่าที่นำมาใช้เกี่ยวกับขีดจำกัดในการวัดคือ ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (Minimum Detectable Activity, MDA) โดยคำนวณได้จากสมการที่ (6) ปัจจัยที่มีผลกับค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่ระบบสามารถวัดได้ประกอบด้วย ประสิทธิภาพในการวัด มวลหรือปริมาตรของตัวอย่าง เวลาที่ใช้นับวัดและค่ารังสีพื้นหลัง (IAEA, 1989)

$$MDA = \frac{4.66S}{\epsilon P \gamma} \frac{n}{W} \quad (6)$$

เมื่อ  $W$  = มวลหรือปริมาตรของตัวอย่าง

### 3.4 สถิติของการวัด การวิเคราะห์ฟีดและการประเมินความไม่แน่นอนของรังสี

ในการวัดค่ากัมมันตภาพรังสีของสารกัมมันตรังสีตัวอย่างเดียวกัน โดยที่เงื่อนไขในการวัดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นระบบการวัด องค์ประกอบจีโอเมทรี (geometry) ของตัวอย่าง หรือระยะเวลาในการวัด จะพบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีที่วัดได้ในแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นค่าที่ได้จึงมีลักษณะแปรปรวนไม่ได้ ค่าที่แน่นอนตายตัว จึงต้องใช้สถิติมาใช้ในการประมาณค่า เพื่อให้ผลการวัดได้ค่ามีความถูกต้องมากที่สุด (ชิคารัตน์, 2548)

#### 3.4.1 สถิติของการวัดรังสี

1. ค่าเฉลี่ย (mean;  $\bar{x}$ ) ในการวัดค่ากัมมันตภาพรังสีนั้น ค่าที่ดีที่สุดคือค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง (sample mean;  $\bar{x}$ ) ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

2. ค่าความแปรปรวน (variance) ความแปรปรวนของประชากร (population variance;  $\sigma^2$ ) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) เมื่อ  $\sigma$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร แต่เนื่องจากค่าเฉลี่ยถูกต้อง (true mean;  $\mu$ ) เป็นค่าที่ไม่สามารถทราบได้โดยแน่นอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างและเมื่อ  $S$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ซึ่งค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง (variance;  $s^2$ ) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9) (Shirley and Stanley, 1983)

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (8)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

3. การกระจายของข้อมูล โดยทั่วไปมี 3 ลักษณะ คือ แบบทวินาม (binomial distribution) แบบปัวซอง (Poisson distribution) และแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution)

3.4.2 ความไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty of measurement) หมายถึง พารามิเตอร์ที่รวมมากับผลของการวัดที่บอกลักษณะการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอ้างได้อย่างสมเหตุสมผลว่าเป็นของปริมาณที่ถูกวัดนั้น (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology [VIM], 2004) เมื่อทดลองวัดสารกัมมันตรังสีซ้ำๆ จะพบว่าค่ากัมมันตภาพที่วัดได้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน แม้ว่าเงื่อนไขในการวัดไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นแบบสุ่ม (ธิดารัตน์, 2548) ดังนั้นจึงต้องมีการนำหลักสถิติมาใช้ในการประมาณค่าและประเมินความไม่แน่นอนของการวัด โดยแบ่งประเภทของความไม่แน่นอนได้ดังนี้

1. ชนิดเอ (type A) คือการประเมินความไม่แน่นอนโดยใช้วิธีทางสถิติแบบการกระจายแบบปกติ ภายใต้เงื่อนไขความสามารถซ้ำกันได้ โดยคำนวณจากการวัดซ้ำหลายๆ ครั้ง และประเมินหาความไม่แน่นอนได้จากสมการที่ (10) (ธิดารัตน์, 2548)

$$u_A = u(x_i) = \sigma_{\text{normal}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนครั้งในการวัด

$U_A$  = ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบชนิดเอ

2. ชนิดบี (type B) คือการประเมินความไม่แน่นอนด้วยวิธีอื่นที่ไม่ใช่วิธีทางสถิติ องค์ประกอบของความไม่แน่นอนของระบบ (systematic uncertainty) หาได้จาก

ก. ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุในคู่มือของเครื่องสอบเทียบมาตรฐาน หาได้จาก

$$U_{B1} = \frac{\text{uncertainty from specification}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

ข. ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบของเครื่องสอบเทียบมาตรฐาน

$$U_{B2} = \frac{U_{SD}}{K} \quad (12)$$

เมื่อ  $U_{SD}$  = ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือมาตรฐาน  
 $K$  = ค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor)

ค. ค่าความไม่แน่นอนของความสามารถในการวัดของเครื่องมือวัด (uncertainty of resolution) หาได้จาก

$$U_{B3} = \frac{\text{resolution}}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

เมื่อ resolution = ความสามารถในการวัดของเครื่องมือวัด (ความละเอียด)

3. การประเมินความไม่แน่นอนรวม (combined uncertainty) ได้จากการรวมความไม่แน่นอนทั้งแบบชนิดเอและบีด้วยสมการ

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2} \quad (14)$$

เมื่อ  $U_c$  = ค่าความไม่แน่นอนรวม

4. ความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty) คือปริมาณที่กำหนดช่วงที่ผลของการวัดกระจายอยู่ภายใน ความไม่แน่นอนขยายมีค่าเท่ากับผลคูณของตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor;  $k$ ) กับความไม่แน่นอนรวม และการรายงานผลการวัดจะสมบูรณ์ได้ต้องรายงานผลการวัดพร้อมกับความไม่แน่นอนขยายและบอกระดับความเชื่อมั่นด้วย ดังสมการที่ (15) - (16)

$$U = k u_c(y) \quad (15)$$

$$Y = y \pm U = \bar{x} \pm k u_c(y) \quad (16)$$

#### 4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนมีอยู่มาก ตัวอย่างเช่น

ปริดา (2549) ศึกษาปริมาณกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเก็บตัวอย่างดิน หิน ทราย และน้ำบ่อตื้น รวม 161 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแกมมาสเปกโตรเมทรี ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ในดินมีค่าอยู่ในช่วง 8-203 (เฉลี่ย  $96 \pm 18$ ) 12-236 (เฉลี่ย  $88 \pm 23$ ) และ 21-1,191 (เฉลี่ย  $524 \pm 127$ ) เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในหินมีค่าอยู่ในช่วง 11-113 (เฉลี่ย  $46 \pm 14$ ) 3-113 (เฉลี่ย  $47 \pm 16$ ) และ 18-1,305 (เฉลี่ย  $472 \pm 187$ ) เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในทรายมีค่าอยู่ในช่วง 3-91 (เฉลี่ย  $42 \pm 5$ ) 14-91 (เฉลี่ย  $50 \pm 5$ ) และ 102-966 (เฉลี่ย  $509 \pm 57$ ) เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Singh *et al.* (2005) วิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพและอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ เรเดียม-226 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ในตัวอย่างดินจาก Punjab และ Himachal Pradesh ประเทศอินเดีย โดยใช้ระบบวัดรังสีแกมมาสเปกโตรเมทรี ผลการวิเคราะห์มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 อยู่ในช่วง 18.22-90.30, 34.80-124.68 และ 80.42-181.41 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีค่า

กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย 57, 87 และ 143 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่ากัมมันตภาพของเรเดียม-226 และ ทอเรียม-232 มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก แต่โพแทสเซียม-40 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก

Kurnaz *et al.* (2007) วิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 โพแทสเซียม-40 และซีเซียม-137 ในตัวอย่างดินและดินตะกอนจาก Firtina Valley โดยใช้ห้ววัดรังสีแกมมาชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง ผลการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างดินมีค่ากัมมันตภาพเฉลี่ยของ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 โพแทสเซียม-40 และซีเซียม-137 คือ 50, 42, 643 และ 85 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในตัวอย่างดินตะกอนมีค่าเฉลี่ย 39, 38, 573 และ 6 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Tsbaris *et al.* (2007) วิเคราะห์ระดับกัมมันตภาพของโพแทสเซียม-40 ซีเซียม-137 บิสมัท-212 ตะกั่ว-212 บิสมัท-214 ตะกั่ว-214 เรเดียม-226 และแอกติเนียม-228 ในตัวอย่างดินตะกอนทะเลสาบและทะเลที่เก็บจากบริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของแอลเบเนีย (Albania) โดยใช้ระบบวัดแกมมาสเปกโตรสโคปี พบว่ามีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของนิวไคลด์ลูกของอนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมทอเรียม อยู่ในช่วง 8-27 และ 13-40 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม และวัดค่ากัมมันตภาพของยูเรเนียม-235 มีค่าอยู่ในช่วง 0.7-2.5 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม

Abdi *et al.* (2008) สํารวจการกระจายของ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 โพแทสเซียม-40 และซีเซียม-137 และคุณสมบัติทางธรณีเคมีในตัวอย่างดินและดินตะกอน บริเวณจุดต่างๆ ในชายฝั่งตะวันตกเฉียงเหนือของอ่าวเปอร์เซีย ระดับความเข้มข้นของค่ากัมมันตภาพจากตัวอย่างดินและดินตะกอนทั้ง 30 ตัวอย่าง พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่วิเคราะห์ได้คือ โพแทสเซียม-40 (146-500 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม) ซีเซียม-137 (5-20 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม) ยูเรเนียม-238 (21-65 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม) และทอเรียม-232 (15-45 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม) โดยมีค่าสูงกว่าค่า LLD ที่มีค่า 68, 3.2, 4.3 และ 4.3 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Dugalic *et al.* (2010) วิเคราะห์กัมมันตภาพรังสีในดินจากทางตะวันตกของเซอร์เบีย มีค่ากัมมันตภาพเฉลี่ยของยูเรเนียม-238 เรเดียม-226 ทอเรียม-232 โพแทสเซียม-40 และ ซีเซียม-137 เป็น  $60.4 \pm 26.2$ ,  $33.2 \pm 13.4$ ,  $49.1 \pm 18.5$ ,  $379 \pm 108$  และ  $36.4 \pm 23.3$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศที่ระยะ 1 เมตรเหนือพื้นดิน  $73.4$  นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง และค่าปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปี (annual effective dose)  $90$  ไมโครซีเวิร์ต

นอกจากนี้การศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินตะกอน ได้แก่ ขนาดอนุภาค ปริมาณอินทรีย์วัตถุ โลหะหนัก และสัตว์หน้าดิน ตัวอย่างเช่น

กรมควบคุมมลพิษ (2546) รายงานคุณภาพดินตะกอนในบริเวณอ่าวไทยตอนใน จากการสำรวจโดยกองทัพเรือเมื่อปี พ.ศ. 2541-2542 พบว่ามีปริมาณ โลหะหนักบางชนิดที่มีค่าเกินมาตรฐานแต่ยังไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตใดในทะเล โลหะหนักดังกล่าวคือปรอทและตะกั่ว ตรวจพบในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน ปากแม่น้ำแม่กลองและปากแม่น้ำบางปะกง ส่วนโลหะหนักพวกทองแดงและโครเมียมพบในบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา แล้วยังพบโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐานที่อาจจะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล คือสังกะสีและตะกั่ว ซึ่งพบในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนและปากแม่น้ำเจ้าพระยา ตามลำดับ

ณรงค์ฤทธิ์ (2547) ศึกษาปริมาณการสะสมและการแพร่กระจายของ ทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว และสารอินทรีย์รวมตามแนวตั้งในดินตะกอน บริเวณอ่าวไทยตอนบน พบว่าค่าเฉลี่ยรวมในทุกระดับความลึกของทองแดงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา บางปะกงและแม่กลอง มีค่าเฉลี่ย 37.65, 25.37 และ 10.91 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณแคดเมียมมีค่าสูงบริเวณมาตาพุด บางปะกงและเจ้าพระยา โดยมีค่าเฉลี่ย 1.52, 1.34 และ 1.07 พีพีเอ็ม ตามลำดับ และตะกั่ว พบว่ามีค่าสูงบริเวณมาตาพุด เจ้าพระยา และบางปะกง โดยมีค่าเฉลี่ย 35.66, 34.03 และ 29.39 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ส่วนปริมาณสารอินทรีย์รวมบริเวณที่มีค่าเฉลี่ยของทุกระดับความลึกปริมาณสูงคือแหลมฉบัง บางปะกง และเพชรบุรี ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย 12.42, 10.64 และ 9.61 ตามลำดับ

Noureddine *et al.* (1998) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคดินตะกอนทะเลต่อความเข้มข้นของการดูดซับนิวไคลด์กัมมันตรังสี เนื่องจากการดูดซับนิวไคลด์กัมมันตรังสีของดินตะกอนทะเลขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและขนาดอนุภาคของดินตะกอน จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีค่าแตกต่างกันในลักษณะของดินตะกอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ดินทราย ทรายละเอียด และโคลน โดยแบ่งช่วงของขนาดอนุภาคออกเป็น 3 ช่วง คือ 800-200 ไมโครเมตร 200-100 ไมโครเมตรและน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับดินตะกอนชนิดทรายปานกลาง ทรายละเอียดและทรายละเอียดมาก ตามลำดับ ตารางที่ 3 ได้แสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนทั้ง 3 ชนิด โดยจะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคดินตะกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร จะมีความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสูงที่สุด

**ตารางที่ 3** ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนที่มีขนาดอนุภาคที่ต่างกัน

ลักษณะดิน ตะกอน	ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)						
	เรเดียม - 226	ตะกั่ว - 214	บิสมัท - 214	แอกติเนียม - 228	ตะกั่ว - 212	โพแทสเซียม -40	ซีเซียม - 137
ทราย	28.6±4.9	11.2±1.8	10.7±2.0	13.4±2.3	15.3±2.3	205±33	0.7±0.2
ทรายละเอียด	54.6±26.9	14.1±4.4	14.4±5.5	23.4±7.8	23.6±6.0	376±91	2.9±0.7
โคลน	89.2±38.8	15.5±4.6	17.5±6.4	26.5±9.4	28.3±6.7	475±132	5.8±2.1

ที่มา: Nouredine *et al.* (1998)

Kim (2007) วิเคราะห์ตัวอย่างดินตะกอนหยาบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) แกมมาสเปกโตรเมทรี (gamma spectrometry) และวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์รวมจากการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างมีเป็นอนุภาคขนาดใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มทราย และมีปริมาณสารอินทรีย์รวมในช่วงร้อยละ 0.06-1.75 และค่ากัมมันตภาพจำเพาะของซีเซียม-137 พบว่ามีค่าระหว่าง 0.5 (น้อยกว่า MDA) ถึง 4.0 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ซึ่งสารอินทรีย์มีผลต่อความสามารถในการยึดติดของซีเซียม-137 กับดินตะกอน

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. ระบบวัดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ประกอบด้วย หัววัดรังสีชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง ORTEC Model GWL-120230 MJ-GWL และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง DSPEC EG&G ORTEC
2. โปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา Gamma Vision for window model A66-B32 v. 5.10
3. เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) รุ่น Jobin Yvon 2000 emission (JY2000)
4. เตาเผาไฟฟ้า (Thermolyne รุ่น 30400)
5. เตาทำความร้อน (Thermolyne รุ่น Cimarec 3)
6. ตู้อบความร้อน (Mettler รุ่น BE 500)
7. เครื่องชั่งละเอียดความถูกต้อง  $\pm 0.0001$  กรัม (Sartorius รุ่น BP 211S)
8. เครื่องตักหน้าดินแบบ Ekman dredge grab
9. โถดูดความชื้น
10. โกร่งบดดิน
11. ตะแกรงร่อนดิน
12. เบ้าเคลือบพร้อมฝา
13. ถังพลาสติกบรรจุตัวอย่าง

### สารเคมีและสารมาตรฐาน

1. กรดไนตริกเข้มข้น (Lab Scan)
2. กรดไฮโดรคลอริก (J.T Baker)
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 30 (Ajax)
4. สารละลายมาตรฐาน โลหะหนักโครเมียม สังกะสี นิกเกิล แคดเมียม แมงกานีส เหล็ก ทองแดง ปรอท ตะกั่ว ในกรดไนตริกร้อยละ 2 (Spex Certiprep)

5. ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน โคบอลต์-60 และ ซีเซียม-137 ความแรงรังสี 1 ไมโครคูรี ณ วันที่ 1 มีนาคม 2540 (Spectrum)

6. ตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6 ที่มีไอโซโทปของ เรเดียม-226 และซีเซียม-137

## วิธีการ

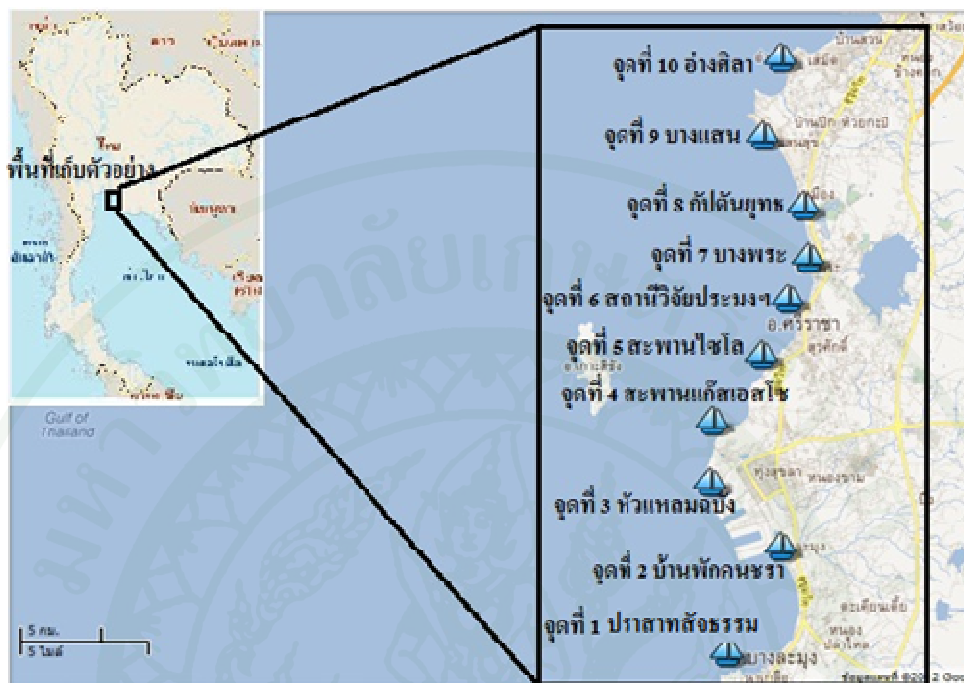
### 1. การเก็บและเตรียมตัวอย่างดินตะกอน

#### 1.1 การเก็บตัวอย่างดินตะกอน

ตัวอย่างดินตะกอนในงานวิจัยนี้ หมายถึง ดินตะกอนที่บริเวณผิวหน้าลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างดินตะกอนแต่ละจุดประมาณ 3-5 กิโลกรัม จากทั้งหมด 10 จุด ดังพิกัดในตารางที่ 4 และแผนที่ในภาพที่ 14 ซึ่งจุดเก็บทั้งหมดอยู่ระหว่าง ตำบลนาเกลือ-ตำบลอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี แต่ละจุดห่างจากชายฝั่งประมาณ 1 กิโลเมตร โดยเก็บตัวอย่าง 3 ช่วงฤดูกาลได้แก่ ครั้งที่ 1 เดือนกันยายน 2553 (ฤดูฝน) ครั้งที่ 2 เดือนธันวาคม 2553 (ฤดูหนาว) และครั้งที่ 3 เดือนมีนาคม 2554 (ฤดูร้อน) โดยใช้การเก็บตัวอย่างแบบผิวหน้าดินตะกอน (Ekman dredge grab) ความลึกประมาณ 20 เซนติเมตร

ตารางที่ 4 พิกัดของจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 10 จุด

จุดเก็บตัวอย่าง	พิกัด	
1. ปราสาทสังขรรม	N 12° 58' 29.1"	E 100° 53' 10.8"
2. บ้านพักคนชรา	N 13° 02' 13.2"	E 100° 55' 02.2"
3. หัวแหลมฉบบัง	N 13° 04' 29.8"	E 100° 52' 35.1"
4. สะพานแก๊สเอสโซ	N 13° 06' 38.5"	E 100° 52' 40.3"
5. สะพานไซโล	N 13° 08' 59.4"	E 100° 54' 20.4"
6. สถานีวิจัยประมง ศรีราชา	N 13° 10' 58.4"	E 100° 55' 16.7"
7. บางพระ	N 13° 12' 25.2"	E 100° 55' 57.9"
8. กัปตันยุทธ	N 13° 14' 17.5"	E 100° 55' 47.4"
9. บางแสน	N 13° 16' 46.3"	E 100° 54' 23.2"
10. อ่างศิลา	N 13° 19' 32.2"	E 100° 55' 0.7"



ภาพที่ 14 แผนที่จุดเก็บตัวอย่าง

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมทรัพยากรชายฝั่งและทะเล (2554)

## 1.2 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนสำหรับวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสี

นำตัวอย่างดินตะกอนมาตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วนำมาบรรจุใส่ภาชนะพลาสติกขนาดความสูง 7 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งมีลักษณะรูปทรงเหมือนกับตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6 ที่นำมาปรับเทียบเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ เมื่อบรรจุใส่ภาชนะแล้วตัวอย่างแต่ละจุดมีน้ำหนักประมาณ 300-500 กรัม

## 2. การปรับเทียบเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ หัววัดรังสีชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง โดยก่อนการวัดตัวอย่างจะต้องดำเนินการปรับเทียบตามขั้นตอนต่างๆดังนี้

## 2.1 การเปรียบเทียบพลังงานของหัววัดรังสี

วางต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานลงบนหัววัด จากนั้นเริ่มนับวัดโดยใช้เวลานับวัด 10,000 วินาทีหรือจนกระทั่งเกิดฟลิกของต้นกำเนิดรังสีขึ้นชัดเจน หลังจากนั้นกำหนดบริเวณที่สนใจ (region of interest, ROI) ของฟลิกที่ตรงกับระดับพลังงานของต้นกำเนิดรังสี แล้วนำค่านับวัดที่ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องสัญญาณกับค่าพลังงานของสารกัมมันตรังสี (IAEA, 1989)

## 2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

หาประสิทธิภาพของหัววัดโดยนำตัวอย่างดินมาตรฐาน IAEA Soil-6 มาทำการนับวัดโดยใช้เวลา 80,000 วินาที หรือจนกระทั่งเห็นฟลิกชัดเจน และคำนวณประสิทธิภาพของหัววัดรังสีสำหรับสารกัมมันตรังสีแต่ละชนิดที่มีพลังงานแตกต่างกันได้จากสมการที่ (4) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดกับค่าพลังงานของรังสีแกมมา (IAEA, 1989)

## 2.3 ศึกษาความคงที่ของระบบวัดรังสี

นำต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน ซีเซียม-137 แบบปิดผนึก มาทำการนับวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้เวลานับวัด 3,600 วินาที วันละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 15 วัน เพื่อศึกษาความคงที่ของระบบวัดรังสี โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (coefficient of variation; CV) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (17) ของตำแหน่งโฟโตพีค ค่า FWHM อัตรานับวัด ประสิทธิภาพของหัววัด และความสามารถในการแยกแยะพลังงานของหัววัดรังสี โดยค่า FWHM และความสามารถในการแยกแยะพลังงาน คำนวณได้จากสมการที่ (2)-(3) ตามลำดับ

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (17)$$

## 2.4 การหาเวลานับวัดที่เหมาะสม

นำตัวอย่างดินตะกอนที่เตรียมสำหรับการวัดมาหาเวลานับวัดที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นนับวัดด้วยเวลา 10,000 วินาที แล้วนำค่าอัตรานับวัดมาคำนวณหาค่า MDA (IAEA, 1989) ซึ่งมีค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามสมการที่ (7) จากนั้นทำซ้ำโดยเพิ่มเวลานับวัดครั้งละ 5,000 วินาที และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลานับวัดกับค่า MDA

## 2.5 การวัดรังสีพื้นหลัง

ทำการนับวัดรังสีพื้นหลัง จากการนับวัดหัววัดเปล่า โดยใช้เวลาที่ได้จากการหาเวลาที่เหมาะสมในการวัดตัวอย่าง จากนั้นนำค่าที่ได้มาใช้สำหรับหักลบกับค่านับวัดของตัวอย่างดินตะกอน เพื่อจะได้ทราบค่านับวัดที่เป็นของตัวอย่างดินตะกอนอย่างแท้จริง

### 3. การวิเคราะห์ตัวอย่างดินตะกอนด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

#### 3.1 การวัดตัวอย่างดินตะกอน

นำตัวอย่างดินตะกอนที่เตรียมสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ มาทำการนับวัด ใช้เวลา 60,000-80,000 วินาที ซึ่งได้จากการหาเวลานับวัดที่เหมาะสม แล้วคำนวณหาค่ากัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างได้จากสมการที่ (18) โดยค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีได้มาจากการเปรียบเทียบก่อนวัดตัวอย่างจริง

$$A = \frac{R_n}{\epsilon P_\gamma W} \quad (18)$$

เมื่อ	A	=	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)
	$R_n$	=	อัตรานับวัดรวมของนิวไคลด์นั้นๆ (ค่านับวัดต่อวินาที)
	$\epsilon$	=	ค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสี
	$P_\gamma$	=	ค่าความน่าจะเป็นสัมบูรณ์ในการสลายตัวและให้รังสีแกมมาที่พลังงานนั้นๆ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างดินตะกอน (กิโลกรัม)

3.2 กำหนดค่าบ่งชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (absorbed dose rates in air; D) กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (radium equivalent activity;  $Ra_{eq}$ ) ดัชนีความเสี่ยงของรังสีภายนอก (external hazard index;  $H_{ex}$ ) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกทรงารอบปี (annual external effective dose rate;  $AED_{out}$ )

โดยนำข้อมูลกัมมันตภาพจำเพาะของ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 มาใช้ในการคำนวณ ตามสมการที่ (19)-(22) (Veiga *et al.*, 2006)

$$D \text{ (นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง)} = 0.0417C_K + 0.462C_U + 0.604C_{Th} \quad (19)$$

$$Ra_{eq} \text{ (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)} = 0.077C_K + C_U + 1.43C_{Th} \quad (20)$$

$$H_{ex} = (C_K/4810) + (C_U/370) + (C_{Th}/259) \quad (21)$$

$$AED_{out} \text{ (มิลลิซีเวิร์ตต่อปี)} = D \times 8760 \times 0.2 \times 0.7(Sv/Gy) \times 10^{-6} \quad (22)$$

เมื่อ  $C_K$   $C_U$  และ  $C_{Th}$  = ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ โปแทสเซียม-40 ยูเรเนียม-238 และ ทอเรียม-232 ตามลำดับ ในหน่วยเบคเคอเรลต่อกิโลกรัม

#### 4. การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินตะกอนด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์

ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและดิน กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร โดยมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข

#### 5. การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินตะกอนประมาณ 5 กรัมใส่เข้าเคลือบที่อบและชั่งน้ำหนักแล้ว จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350-440 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเผาครบตามเวลาที่กำหนดแล้วนำออกมาวางให้เย็นใน โถดูดความชื้น แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างหลังการเผา และคำนวณปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนได้จากสมการที่ (23) (Schumacher, 2002)

$$\text{ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (23)$$

- เมื่อ A = น้ำหนักดินตะกอนก่อนเผา (กรัม)  
 B = น้ำหนักดินตะกอนหลังเผา (กรัม)

## 6. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนและในสัตว์หน้าดิน

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินตะกอนประมาณ 1 กรัม และชั่งน้ำหนักตัวอย่างสัตว์หน้าดิน แต่เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณน้อยจึงใช้ตัวอย่างทั้งหมด ใส่ขวดรูปชมพู่ นำมาเติม 1:1 กรดไนตริก 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 92-95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำออกจากเตา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนต่ออีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที ให้สารละลายที่เหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่มีปริมาตรประมาณ 5 มิลลิลิตร และนำออกจากเตา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นอีกครั้ง เมื่อสารละลายเย็นแล้วเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และ 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนต่อ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดควันสีขาวโดยจะต้องให้ความร้อนจนควันสีขาวที่เกิดขึ้นนั้นหมดไป แล้วจึงเติม 1:1 กรดไฮโดรคลอริก 5 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และให้ความร้อนต่อไปอีกเป็นเวลา 10 นาที จึงนำออกจากเตาและทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำสารละลายที่เย็นแล้วมากรอง และปรับปริมาตรสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วให้เป็น 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดโพลีเอทิลีนเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-AES (EPA, 1994) โดยสามารถคำนวณปริมาณโลหะหนักได้จากสมการที่ (24)

$$\text{ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)} = \frac{(A \times B)}{W} \quad (24)$$

- เมื่อ A = ปริมาณโลหะหนักที่วัดด้วยเครื่อง ICP-AES (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 B = ปริมาตรรวมของตัวอย่างหลังการย่อย (มิลลิลิตร)  
 W = น้ำหนักของตัวอย่างดินที่ทำการย่อย (กรัม)

## 7. การวิเคราะห์ชนิดของสัตว์หน้าดิน

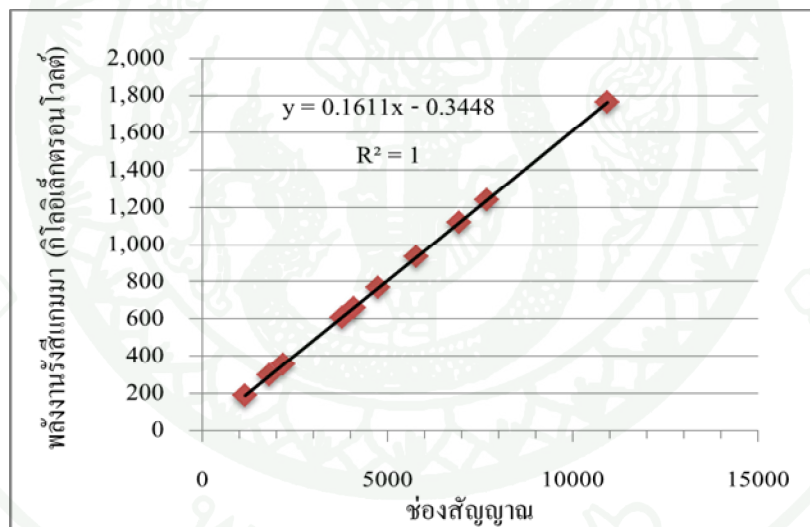
ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่สถานีวิจัยประมง ศรีราชา ฝ่ายสนับสนุนวิชาการ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก จ

## ผลและวิจารณ์

### 1. การเปรียบเทียบเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

#### 1.1 การเปรียบเทียบพลังงานของหัววัดรังสี

การเปรียบเทียบพลังงานของหัววัดรังสีเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างช่องสัญญาณกับพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสี พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตามสมการ  $y = 0.1611x - 0.3448$  ดังภาพที่ 15 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 1 และแต่ละช่องสัญญาณของ MCA ตรงกับค่าพลังงานของรังสีแกมมาเท่ากับ 0.16 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์

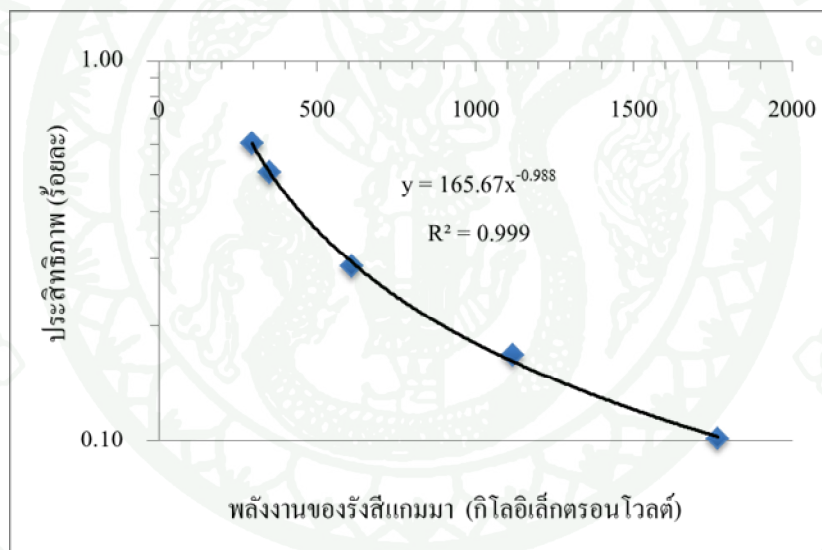


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานรังสีแกมมากับช่องสัญญาณ

#### 1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6 ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินอ้างอิง แสดงดังตารางผนวกที่ ก1 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับพลังงานของรังสีแกมมา แสดงดังภาพที่ 16 โดยมีความสัมพันธ์เป็นสมการยกกำลัง  $y = 165.67x^{0.988}$  เมื่อ  $x$  คือ พลังงานรังสีแกมมา (กิโลอิเล็กตรอน โวลต์) และ  $y$  คือ ประสิทธิภาพของหัววัด (ร้อยละ) โดยปกติแล้วที่รังสีแกมมาพลังงานต่ำๆ

ประสิทธิภาพของหัววัดจะมีค่าสูง เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากขึ้น ประสิทธิภาพของหัววัดจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆเมื่อพลังงานรังสีแกมมามีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จุดที่ประสิทธิภาพของหัววัดที่มีค่าสูงสุด เรียกว่า Knee ซึ่งแบ่งเส้นโค้งของค่าประสิทธิภาพออกเป็นสองส่วน นั่นคือส่วนแรกเป็นส่วนที่พลังงานต่ำๆค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคุณสมบัติการดูดกลืนพลังงานของหัววัด และส่วนที่สองจะเกิดที่พลังงานมากกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ค่าประสิทธิภาพจะลดลงจนในที่สุดจะขนานกับแกนราบที่พลังงานประมาณ 1,200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (โสวุฒิ, 2553) แต่เนื่องจากตัวอย่างดินอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของงานวิจัยนี้เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีพลังงานรังสีแกมมามากกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ออกมาเพียงช่วงเดียว



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดกับพลังงานรังสีแกมมา

### 1.3 ความคงที่ของระบบวัดรังสี

จากการวัดซีเซียม-137 ที่พลังงาน 661.62 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้เวลานับวัดครั้งละ 3,600 วินาที วันละ 1 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 15 วัน ได้ผลดังตารางที่ 5 พบว่าค่าเฉลี่ยของตำแหน่งโฟโตพีคเท่ากับ 661.51 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ค่า FWHM เท่ากับ 2.61 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อัตรานับวัดสุทธิ เท่ากับ 119.51 ครั้งต่อวินาที ประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 0.53 และความสามารถในการแยกแยะพลังงานเท่ากับร้อยละ 0.4

ความคงที่ของระบบวัด จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร ซึ่งตำแหน่งโฟโตพิค ค่าFWHM อัตรานับวัดสุทธิ ประสิทธิภาพและความสามารถในการแยกแยะพลังงาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.01, 1.09, 2.73, 2.70 และ 1.09 ตามลำดับ โดยเฉพาะตำแหน่งโฟโตพิค FWHM และความสามารถในการแยกแยะพลังงานจะเห็นได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรน้อยมาก แสดงให้เห็นถึงการกระจายของข้อมูลต่ำ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรที่ดีควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 1.5 (โศวูฒิ, 2553) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรของอัตรานับวัดสุทธิและประสิทธิภาพมีค่ามากกว่าร้อยละ 1.5 เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีที่ใช้มีค่ากัมมันตภาพค่อนข้างสูงและการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเป็นแบบสุ่ม การวัดแต่ละครั้งจึงได้ค่านับวัดไม่เท่ากัน ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรค่อนข้างมาก

**ตารางที่ 5** ความคงที่ของระบบวัดรังสีจากการวัดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137

วันที่วัด	โฟโตพิค (กิโล อิเล็กตรอน โวลต์)	FWHM (กิโล อิเล็กตรอน โวลต์)	อัตรานับวัด (ครั้งต่อวินาที)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	การแยกแยะ พลังงาน (ร้อยละ)
1	661.61	2.59	123	0.55	0.39
2	661.61	2.61	118	0.52	0.39
3	661.61	2.69	127	0.57	0.41
4	661.61	2.58	122	0.54	0.39
5	661.77	2.64	120	0.53	0.40
6	661.77	2.57	120	0.53	0.39
7	661.77	2.60	121	0.54	0.39
8	661.77	2.60	120	0.53	0.39
9	661.77	2.61	117	0.52	0.39
10	661.77	2.61	115	0.51	0.39
11	661.61	2.60	116	0.51	0.39
12	661.61	2.61	115	0.51	0.39
13	661.61	2.63	119	0.53	0.40
14	661.61	2.60	121	0.54	0.39
15	661.61	2.63	119	0.53	0.40
X	661.67	2.61	120	0.53	0.4
SD	0.08	0.03	3	0.01	0.004
C.V. (ร้อยละ)	0.01	1.09	2.73	2.70	1.09

## 1.4 การหาเวลานับวัดที่เหมาะสม

จากการทดลองเพื่อหาเวลานับวัดที่เหมาะสมโดยใช้ตัวอย่างดินตะกอนในจุดที่ 1 ของตัวอย่างจากฤดูฝน ใช้เวลานับวัดตั้งแต่ 10,000 - 100,000 วินาที และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า MDA กับเวลาที่ใช้นับวัด (ภาพผนวกที่ ก1-ก8) พบว่าเมื่อเพิ่มเวลานับวัดมากขึ้นค่า MDA มีค่าลดลง ซึ่งในช่วงแรกที่เวลานับวัดระหว่าง 10,000 - 50,000 วินาที จะเห็นได้ว่าค่า MDA มีค่าลดลงค่อนข้างมาก จนกระทั่งเมื่อใช้เวลานับวัดระหว่าง 60,000 - 100,000 วินาที พบว่าค่า MDA มีค่าลดลงน้อยมาก ซึ่งแสดงว่าแม้ว่าจะเพิ่มเวลานับวัดต่อไปอีกก็ไม่ทำให้ค่า MDA ลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับการนับวัดตัวอย่างอยู่ในช่วง 60,000 - 80,000 วินาที เพื่อประหยัดเวลา ซึ่งแต่ละตัวอย่างอาจจะใช้เวลานับวัดไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามในการคำนวณค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีไอโซทรานับวัดในการคำนวณ ดังนั้นถึงแม้ว่าจะใช้เวลานับวัดไม่เท่ากันก็สามารถคำนวณค่ากัมมันตภาพได้

## 1.5 จิตจำกัดการวัดรังสี (LLD) และปริมาณรังสีต่ำสุดที่เครื่องสามารถตรวจวัดได้ (MDA)

การคำนวณค่า LLD และ MDA สำหรับซีเซียม-137 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.78 เบคเคอเรล และ 2.46 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## 2. การวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน

จากการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดชลบุรี ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ หัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง โดยเป็นตัวอย่างที่เตรียมให้มีลักษณะรูปทรงเหมือนกับตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6 และเกิดสมมูล พบนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติคือ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ดังตารางที่ 6 โดยคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของยูเรเนียม-238 จากค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยระหว่าง ตะกั่ว-214 (351.92 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) และบิสมัท-214 (609.31 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) สำหรับทอเรียม-232 คำนวณจากค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยระหว่าง แทลเลียม-208 (583.00 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) และแอกทิเนียม-228 (911.07 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) ส่วนโพแทสเซียม-40 คำนวณจากโพโตพิคที่พลังงาน 1,460.81 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (Lee *et al.*, 2009) สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สำคัญคือ ซีเซียม-137 ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้นจะพิจารณาจากโพโตพิคที่พลังงาน 661.66 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แต่อย่างไรก็ตามไม่พบพิคของซีเซียม-137 ในตัวอย่างดินตะกอน

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 6 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างทั้ง 10 จุด ในแต่ละฤดูกาลมีดังนี้ ฤดูฝน  $44\pm 10$ ,  $59\pm 17$  และ  $463\pm 94$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ฤดูแล้ง  $41\pm 6$ ,  $50\pm 9$  และ  $484\pm 83$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และฤดูร้อน  $39\pm 6$ ,  $41\pm 7$  และ  $472\pm 81$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนที่วัดได้กับค่าที่รายงานของประเทศต่างๆทั่วโลกกับค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR ซึ่งมีค่าไม่เกิน 35, 30 และ 400 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม สำหรับยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 ตามลำดับ (ตารางที่ 7) พบว่าค่าเฉลี่ยของทุกฤดูกาลในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR แต่หลายประเทศก็มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR เช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาในแต่ละจุดพบว่า บางจุดมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสามชนิดน้อยกว่าจุดอื่นๆ และมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดังกล่าวได้แก่ จุดที่ 4 (สะพานแก๊สเอสโซ) และจุดที่ 6 (สถานีวิจัยประมง ศรีราชา) ส่วนในจุดที่ 9 (บางแสน) มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 อยู่ในระดับต่ำทั้งสามฤดูกาล แต่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของโพแทสเซียม-40 สูง ในขณะที่จุดที่ 8 (กัปตันยุทธ) ฤดูฝนมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ทั้งสามชนิดสูงที่สุดและสูงกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR มาก แต่ในฤดูแล้งและฤดูร้อนกลับมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย แต่โพแทสเซียม-40 ยังคงมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะจุดเก็บตัวอย่างอยู่ไม่ห่างจากชายฝั่งมากนัก ในฤดูฝนจึงอาจมีการชะเอาดินตะกอนบริเวณชายฝั่งเข้ามาในบริเวณจุดเก็บได้ จึงทำให้ตัวอย่างในบางจุดเช่นจุดที่ 1 (ปราสาทสังฆกรรม) และ จุดที่ 8 (กัปตันยุทธ) มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะในฤดูฝนสูงกว่าอีกสองฤดูกาลได้

ค่ากัมมันตภาพรวมของนิวไคลด์ทั้งสามชนิด แต่ละฤดูกาลมีค่าดังนี้ ฤดูฝน 135-1,322 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ฤดูแล้ง 163-992 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม และฤดูร้อน 176-1,046 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงดังภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินตะกอนเกือบทุกจุดที่เก็บในฤดูแล้งและฤดูร้อน มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ทั้งสามชนิดสูงกว่าฤดูฝน ยกเว้นจุดที่ 8 (กัปตันยุทธ) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำฝนและทิศทางลมมรสุมมีผลต่อระดับปริมาณรังสี (ศรีบุญญา, 2553) เพราะอ่าวไทยอยู่ในอิทธิพลของมรสุม คือ มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (เดือนพฤษภาคม-กันยายน) และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (เดือนตุลาคม-กุมภาพันธ์) โดยมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้ฝนตกชุกทางฝั่งตะวันออก ส่วนมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือทำให้ฝนตกชุกทางฝั่งตะวันตกของอ่าว โดยเฉพาะลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งตามธรรมชาติในรอบปี โดยแนวชายฝั่งตะวันออกจะมีปริมาตรทรายลดลงในช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แต่จะมีปริมาตรทรายตามแนวชายฝั่งเพิ่มขึ้นในช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

เพราะในช่วงฤดูมรสุมนี้มีการพัดพาความชุ่มชื้นจากอ่าวไทยเข้าฝั่งทำให้เกิดฝนตก มีคลื่นลมแรง บริเวณชายฝั่งอ่าวไทยตอนบนและฝั่งตะวันออก เกิดคลื่นขนาดใหญ่กว่าปกติ (สทช., 2555) ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของงานวิจัยนี้ โดยพบว่าตัวอย่างดินตะกอนในฤดูฝน ซึ่งอยู่ในช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีปริมาณของอนุภาคทรายมากกว่าฤดูหนาวและฤดูร้อน ที่อยู่ในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ตารางผนวกที่ ข1-ข3) จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ในฤดูฝนมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดต่างๆ น้อยกว่าฤดูหนาวและฤดูร้อน

เมื่อศึกษาความแตกต่างของฤดูกาลโดยทดสอบทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ของทั้งสามฤดูกาลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) แต่โพแทสเซียม-40 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) นอกจากฤดูกาลแล้วยังมีปัจจัยอื่น เช่น พื้นที่ สภาพแวดล้อมและกิจกรรมของในบริเวณจุดเก็บก็ส่งผลต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนเช่นกัน จะเห็นได้ชัดเจนในจุดที่ 6 (สถานีวิจัยประมง ศรีราชา) ซึ่งเป็นจุดที่มีค่ากัมมันตภาพรังสีรวมค่าที่สุด โดยในบริเวณดังกล่าวมีการทำแพเลี้ยงหอยแมลงภู่มาก่อนข้างมาก และเปลือกหอยมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากมีรูพรุนและพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก และมีแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณสูง (ชยาภาส และ ลินศุภา, 2548) ดังนั้นจึงดูดซับนิวไคลด์กัมมันตรังสีไว้ได้มาก ส่งผลให้มีปริมาณการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนน้อยลง ในจุดนี้จึงมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะน้อยกว่าจุดอื่นๆ และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างแต่ละจุดเก็บก็พบว่าทั้ง 10 จุด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) สำหรับทุกนิวไคลด์และทุกฤดูกาล

จากผลการทดลองที่กล่าวไปข้างต้นพบว่าภาพรวมของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของศรีบุญญา (2553) ที่เก็บตัวอย่างจากจุดเดียวกัน และนำมาวิเคราะห์ปริมาณรังสีแอลฟาและบีตา รวมในตัวอย่างเป็นดินตะกอน โดยพบว่าจุดที่มีปริมาณรังสีแอลฟา รวมค่าที่สุดคือจุดที่ 9 (บางแสน) และมากที่สุดคือจุดที่ 8 (กัปตันยุทธ) ส่วนการวัดปริมาณรังสีบีตา รวมจุดที่มีปริมาณรังสีบีตา รวมค่าที่สุดคือจุดที่ 6 (สถานีวิจัยประมง ศรีราชา) และมากที่สุดคือจุดที่ 8 (กัปตันยุทธ) เช่นเดียวกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่พบว่าค่ากัมมันตภาพรวม น้อยที่สุดคือจุดที่ 6 (สถานีวิจัยประมง ศรีราชา) และจุดที่ 9 (บางแสน) และมากที่สุดคือจุดที่ 8 (กัปตันยุทธ)

สำหรับการคำนวณค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่างๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 8 พบว่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าอยู่ในช่วง 27-112 (เฉลี่ย  $69 \pm 8$ ) นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศไทยที่มีค่า 77 นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง

(UNSCEAR, 2000) ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม ( $R_{eq}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 59-243 (เฉลี่ย  $149 \pm 19$ ) เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้คือ 370 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (OECD, 1979) ค่าดัชนีความเสี่ยงของรังสีภายนอก ( $H_{ex}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.7 (เฉลี่ย  $0.4 \pm 0.05$ ) ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้คือไม่ควรเกิน 1.0 (El-Taher and Madkour, 2011) ส่วนปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอก ร่างกายรอบปี ( $AED_{out}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.03-0.14 (เฉลี่ย  $0.08 \pm 0.01$ ) มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของทั่วโลกที่มีค่า 0.48 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี (UNSCEAR, 2000)

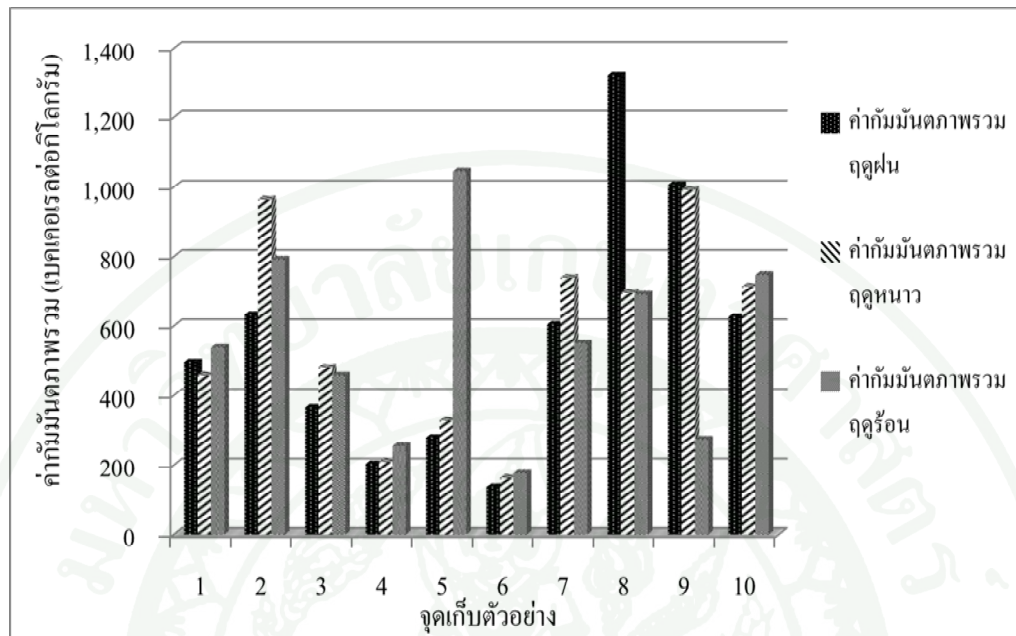
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนทั้งสามฤดูกาล

จุดเก็บตัวอย่าง	นิวไคลด์	กัมมันตภาพจำเพาะ (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)			ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.E.
		ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
1. ปราสาทจักรวรรม	ยูเรเนียม-238	45	40	75	$54 \pm 9$
	ทอเรียม-232	40	38	62	$47 \pm 6$
	โพแทสเซียม-40	409	379	401	$396 \pm 7$
	รวม	494	457	538	
2. บ้านพักคนชรา	ยูเรเนียม-238	37	69	42	$49 \pm 8$
	ทอเรียม-232	48	78	50	$58 \pm 8$
	โพแทสเซียม-40	547	817	700	$688 \pm 64$
	รวม	632	964	791	
3. หัวแหลมฉับัง	ยูเรเนียม-238	37	45	41	$41 \pm 2$
	ทอเรียม-232	41	53	49	$48 \pm 3$
	โพแทสเซียม-40	287	381	366	$345 \pm 24$
	รวม	365	479	456	
4. สะพานแก๊ส เอสโซ	ยูเรเนียม-238	24	26	33	$27 \pm 2$
	ทอเรียม-232	28	30	37	$31 \pm 2$
	โพแทสเซียม-40	151	153	184	$163 \pm 9$
	รวม	202	209	253	
5. สะพานไซโล	ยูเรเนียม-238	37	36	15	$29 \pm 6$
	ทอเรียม-232	31	37	14	$27 \pm 6$
	โพแทสเซียม-40	210	255	1,017	$494 \pm 214$
	รวม	278	328	1,046	

## ตารางที่ 6 (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง	นิวไคลด์	กัมมันตภาพจำเพาะ (เบกเคอเรลต่อกิโลกรัม)			ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.E.
		ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
6. สถานีวิจัยประมงฯ	ยูเรเนียม-238	18	20	20	19 $\pm$ 0.4
	ทอเรียม-232	18	22	24	22 $\pm$ 1
	โพแทสเซียม-40	99	120	132	117 $\pm$ 8
	รวม	135	163	176	
7. บางพระ	ยูเรเนียม-238	66	73	30	56 $\pm$ 11
	ทอเรียม-232	95	110	39	81 $\pm$ 18
	โพแทสเซียม-40	443	556	481	493 $\pm$ 27
	รวม	603	739	550	
8. กัปตันยุทธ	ยูเรเนียม-238	128	22	41	63 $\pm$ 27
	ทอเรียม-232	208	25	23	85 $\pm$ 50
	โพแทสเซียม-40	986	649	628	754 $\pm$ 95
	รวม	1,322	696	691	
9. บางแสน	ยูเรเนียม-238	14	19	27	20 $\pm$ 3
	ทอเรียม-232	14	19	23	19 $\pm$ 2
	โพแทสเซียม-40	977	954	223	718 $\pm$ 202
	รวม	1,006	992	273	
10. อ่างศิลา	ยูเรเนียม-238	38	56	66	53 $\pm$ 7
	ทอเรียม-232	63	86	92	80 $\pm$ 7
	โพแทสเซียม-40	524	572	589	562 $\pm$ 16
	รวม	625	715	747	
ค่าเฉลี่ย $\pm$ SE	ยูเรเนียม-238	44 $\pm$ 10	41 $\pm$ 6	39 $\pm$ 6	
	ทอเรียม-232	59 $\pm$ 17	50 $\pm$ 9	41 $\pm$ 7	
	โพแทสเซียม-40	463 $\pm$ 94	484 $\pm$ 83	472 $\pm$ 81	

หมายเหตุ SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



ภาพที่ 17 ค่ากัมมันตภาพรังสีรวมของแต่ละฤดูกาล

ตารางที่ 7 ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในดินตะกอนจากแหล่งต่างๆทั่วโลก

ประเทศ	นิวไคลด์กัมมันตรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)				ที่มา
	เรเดียม-226	ยูเรเนียม-238	ทอเรียม-232	โพแทสเซียม-40	
Albania	13-23	8-27	13-40	266-675	Tsbaris et al. (2007)
Spain	62-2,939	77-6,401	12-63	-	Lozano et al. (2002)
Spain	9-14	-	11-16	220-460	Ligero et al. (2001)
Algeria	-	11-25	6-32	56-607	Benamar et al. (1997)
Egypt	4-48	-	8-50	16-487	Ibrahiem et al. (1995)
Italy	-	422-70	31-37	410-475	Doretti et al. (1992)
Greece	19-81	29-110	19-88	152-1,593	Florou and Kriditis (1992)
French	9-62	9-62	16-55	120-1,026	Lambrechts et al. (1992)
Turkey	15-116	16-113	17-87	41-1,605	Kurnaz et al. (2007)
งานวิจัยนี้	-	39-44	41-59	463-484	
UNSCEAR	35	35	30	400	

ที่มา: Kurnaz *et al.* (2007), UNSCEAR (2000)

**ตารางที่ 8** ค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่างๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ

จุดเก็บตัวอย่าง	D (นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง)	Ra <sub>eq</sub> (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)	H <sub>ex</sub>	AED <sub>out</sub> (มิลลิซีเวิร์ตต่อปี)
1. ปราสาทจักรพรรม	69	151	0.4	0.09
2. บ้านพักคนชรา	87	186	0.5	0.11
3. หัวแหลมฉบบัง	62	136	0.4	0.08
4. สะพานแก๊สเอสโซ	38	85	0.2	0.05
5. สะพานไซโล	51	106	0.3	0.06
6. สถานีวิจัยประมงฯ	27	59	0.2	0.03
7. บางพระ	96	210	0.6	0.12
8. กัปตันยุทธ	112	243	0.7	0.14
9. บางแสน	51	102	0.3	0.06
10. อ่างศิลา	97	211	0.6	0.12
ค่าเฉลี่ย±SE	69±8	149±19	0.4±0.05	0.08±0.01

### 3. ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนแสดงผลดังตารางที่ 10 โดยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนพบว่ามียอดใหญ่เป็นอนุภาคทรายประมาณร้อยละ 70-90 รองลงมาคือทรายแป้งร้อยละ 0-24 และดินเหนียวร้อยละ 3-10 เมื่อนำสัดส่วนปริมาณอนุภาคแต่ละชนิดที่ได้นี้ไปเทียบกับไคอะแกรมสามเหลี่ยมเพื่อพิจารณาเนื้อดิน (ภาพที่ 3) พบว่าเป็นประเภทกลุ่มดินเนื้อหยาบ ได้แก่ ดินทราย ดินทรายร่วน และดินร่วนทราย โดยแต่ละจุดอาจมีความละเอียดแตกต่างกันออกไปตามสัดส่วนของขนาดอนุภาคแต่ละชนิด ซึ่งขนาดอนุภาคเป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่จะสามารถอธิบายคุณสมบัติของดินตะกอนนั้นได้

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน พบว่ามีค่าเฉลี่ยทั้งสามฤดูกาลอยู่ระหว่างร้อยละ 0.14-0.62 เมื่อเทียบกับการประเมินปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินของกรมพัฒนาที่ดินที่กำหนดไว้ว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าร้อยละ 0.5 จัดว่าอยู่ในระดับต่ำมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2515) จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินตะกอนที่วิเคราะห์ส่วนใหญ่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่เกินร้อยละ 0.5 ยกเว้นในจุดที่ 3 (หัวแหลมฉบบัง) ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนร้อยละ 0.62 ซึ่งมากกว่าจุด

อื่นๆ แต่ก็ยังจัดว่ายังมีปริมาณอินทรียวต์อยู่ในระดับต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เพราะขนาดอนุภาคมีผลต่อปริมาณอินทรียวต์ในดินตะกอน โดยจะเห็นได้ว่าในจุดที่3 (หัวแหลมฉะบ่ง) นี้มีสัดส่วนของอนุภาคทรายน้อยที่สุดและมีสัดส่วนของดินเหนียวมากที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอื่นๆ ซึ่งโดยปกติแล้วดินตะกอนที่เป็นทรายจะมีปริมาณอินทรียวต์น้อยมากและจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของทรายลดลง (ณรงค์ฤทธิ์, 2547) เพราะอนุภาคขนาดใหญ่อย่างอนุภาคทรายนั้นมีพื้นที่ผิวที่จะดูดซับอินทรียวต์ได้น้อย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าในดินตะกอนที่มีความละเอียดมากขึ้นก็จะมีปริมาณอินทรียวต์มากขึ้นนั่นเอง (Kim *et al.*, 2006)

#### ความสัมพันธ์ระหว่างนิวไคลด์กัมมันตรังสีกับขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรียวต์

จากที่กล่าวไปข้างต้นว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อคุณสมบัติของดินตะกอน โดยค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเพิ่มขึ้นผกผันกับขนาดอนุภาค โดยที่ยูเรเนียมและทอเรียม จะสัมพันธ์กับอนุภาคที่เป็นแร่หนัก ในขณะที่โพแทสเซียมจะสัมพันธ์กับอนุภาคที่เป็นแร่ดินเหนียว (Tsabaris *et al.*, 2007) ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็ก จะมีความสามารถดูดซับนิวไคลด์กัมมันตรังสีไว้ได้มาก เนื่องจากมีพื้นที่หรือช่องว่างสำหรับการดูดซับสารต่างๆ ได้มากและยังมีประจุที่สามารถแลกเปลี่ยนกับสารอินทรีย์ได้ดี (จิรารัตน์, 2551) และผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในงานวิจัยนี้ พบว่าตัวอย่างจัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อหยาบ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ตรวจพบ จะเห็นได้ว่ายูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ส่วนมากมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะสูงกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR เนื่องจากอนุภาคทรายเป็นสัดส่วนที่มีมากที่สุดในตัวอย่างเป็นดินตะกอน โดยอนุภาคทรายมีส่วนประกอบเป็นแร่ควอตซ์เป็นส่วนใหญ่ (ศิริมาศ, 2550) ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสพบยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ได้มาก ส่วนโพแทสเซียม-40 นั้นหลายๆจุดมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR สัมพันธ์กับผลขนาดอนุภาค แต่ในหลายๆจุดก็มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะสูงกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR แต่สำหรับซีเซียม-137 ไม่พบว่ามีอยู่ในตัวอย่างดินตะกอนหรือมีน้อยกว่าค่า MDA ของระบบวัด เนื่องจากซีเซียม-137 เป็นนิวไคลด์ที่มีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกับโพแทสเซียม-40 จึงมีการแข่งขันกันในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างสูง เมื่อมีปริมาณโพแทสเซียม-40 มาก จึงมีโอกาสแข่งขันในการทำปฏิกิริยากับซีเซียม-137 มากจึงทำให้พบซีเซียม-137 ได้น้อย (Kubica *et al.*, 2007)

สำหรับปริมาณอินทรียวต์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความเชื่อมโยงกับปริมาณการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน เพราะอินทรียวต์เป็นสารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร (Alloway, 1995) ถึงแม้ว่าอินทรียวต์จะไม่มีพันธะที่แข็งแรงแต่ถ้าในดินตะกอนมีปริมาณ

อินทรีย์วัตถุอยู่มากก็จะส่งผลให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีสะสมในดินตะกอนได้มากตามไปด้วย (Rigol *et al.*, 2002) โดยนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ทำปฏิกิริยาได้มากกับอินทรีย์วัตถุ และมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณของอินทรีย์วัตถุคือ โปแทสเซียม-40 และซีเซียม-137 (Ligero *et al.*, 2001; Dumat *et al.*, 2000) โดยจะเห็นได้ว่าทุกๆจุดนั้นมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำมากเมื่อเทียบกับเกณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดิน ยกเว้นจุดที่ 3 (หัวแหลมฉับัง) ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุจัดอยู่ในระดับต่ำ สอดคล้องกับการตรวจพบนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยไม่พบซีเซียม-137 แต่พบโปแทสเซียม-40 เพราะเป็นนิวไคลด์ที่มีอยู่ในพื้นโลกอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในจุดนี้ก็ไม่ได้แตกต่างจากจุดอื่นๆมากนัก เพราะดินตะกอนในจุดนี้ก็ยังคงจัดว่าเป็นกลุ่มดินเนื้อหยาบ และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำนั่นเอง

**ตารางที่ 9** ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอน

จุดเก็บตัวอย่าง	ชนิดอนุภาค			เนื้อดิน	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)
	ทราย (ร้อยละ)	ทรายแป้ง (ร้อยละ)	ดินเหนียว (ร้อยละ)		
1. ปราสาทสังฆกรรม	84.60±2.23	9.27±1.10	6.13±1.21	ดินทรายร่วน	0.38±0.07
2. บ้านพักคนชรา	80.93±4.13	11.87±2.00	7.20±2.50	ดินทรายร่วน	0.41±0.07
3. หัวแหลมฉับัง	64.20±12.33	23.13±10.69	12.67±2.14	ดินร่วนทราย	0.62±0.05
4. สะพานแก๊สเอสโซ	78.47±2.81	15.60±2.62	5.93±0.23	ดินทรายร่วน	0.37±0.01
5. สะพานไซโล	78.87±9.27	15.20±8.62	5.93±1.03	ดินทรายร่วน	0.29±0.04
6. สถานีวิจัยประมงฯ	79.27±3.83	6.67±3.10	5.13±1.10	ดินทรายร่วน	0.37±0.11
7. บางพระ	88.20±7.47	6.67±5.95	5.13±1.53	ดินทราย	0.27±0.11
8. กัปตันยุทธ	89.27±2.70	5.93±1.90	4.80±0.80	ดินทรายร่วน	0.22±0.08
9. บางแสน	94.73±2.34	2.30±2.00	3.73±0.46	ดินทราย	0.14±0.03
10. อ่างศิลา	67.87±6.31	25.60±4.61	6.53±1.86	ดินร่วนทราย	0.37±0.12

#### 4. ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอนและโลหะหนักในสัตว์หน้าดิน

ผลการวิเคราะห์โลหะหนักทั้ง 9 ชนิด ประกอบด้วยโครเมียม สังกะสี นิกเกิล แคดเมียม แมงกานีส เหล็ก ทองแดง โปรทและตะกั่ว ในดินตะกอนและในสัตว์หน้าดิน แสดงในตารางผนวกที่ 1 – 2 โดยในดินตะกอนแต่ละจุดมีความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเฉลี่ยทั้ง 3 จุดกาลอยู่ในช่วง 195-888, 25-70, 68-125, 15-36, 75-472, 2,786- 11,940, 15- 144, 60-93, 70-222 มิลลิกรัม

ต่อกิโกลรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 10 เมื่อเรียงลำดับปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักจากมากไปน้อยคือ เหล็ก โครเมียม แมงกานีส ตะกั่ว นิกเกิล พรอท สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ตามลำดับ ส่วนปริมาณโลหะหนักในสัตว์หน้าดินผลการวิเคราะห์แต่ละจุดและแต่ละฤดูกาลมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสัตว์หน้าดินที่เก็บมาได้แต่ละครั้งมีชนิดที่ต่างกันและมีจำนวนไม่เท่ากัน และการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งมีปริมาณสัตว์หน้าดินจำนวนน้อยมากจึงทำให้วิเคราะห์ตัวอย่างได้เพียงจุดละหนึ่งซั้ดต่อครั้งทีเก็บตัวอย่าง อย่างไรก็ตามการที่ดินตะกอนเป็นที่รองรับและสะสมโลหะหนักที่ปนเปื้อนลงในน้ำก็ทำให้สัตว์หน้าดินจึงมีโอกาสได้รับโลหะหนักไปสะสมมากตามไปด้วย

จากผลการวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอนและโลหะหนักในสัตว์หน้าดินจะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในบริเวณต่างๆมีปริมาณแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของโลหะหนักแต่ละชนิด และลักษณะพื้นที่จุดเก็บตัวอย่าง โดยเฉพาะโลหะหนักที่ปลดปล่อยจากกิจกรรมต่างๆในบริเวณนั้นย่อมมีผลต่อการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอน เพราะจุดเก็บตัวอย่างแต่ละจุดนั้นอยู่ในบริเวณที่เป็นแหล่งชุมชน เขตอุตสาหกรรม และใกล้กับทางไหลของลำคลองต่างๆกับทะเล อีกทั้งในสภาพตามธรรมชาติก็มีโลหะหนักสะสมอยู่แล้วทั้งในน้ำและดินตะกอน และมีเพิ่มมากขึ้นอีกจากการพัฒนาของมนุษย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการนำโลหะหนักต่างๆมาใช้ในกิจกรรม เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ที่ไม่สิ้นสุดจนทำให้โลหะหนักเกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น แตกต่างกันไปตามลักษณะของกลุ่มน้ำที่ไหลผ่านและพัดพาดินตะกอนลงมา ซึ่งการปนเปื้อนโลหะหนักมักพบว่าจะมีการปนเปื้อนในดินตะกอนได้มากกว่าในน้ำ เพราะดินตะกอนมีประจุลบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนโลหะหนักมีประจุเป็นบวกจึงมีความสามารถยึดเกาะกับดินตะกอนได้ดีกว่าในน้ำ (สร้อยญา, 2544) และเนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างภายหลังจากเก็บตัวอย่างมามีการทำให้ตัวอย่างแห้ง โดยการผึ่งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสาเหตุนี้อาจจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในน้ำซึ่งไม่สามารถระเหยออกไปได้จึงมีการสะสมตกค้างอยู่ในดินตะกอนค่อนข้างมาก สำหรับการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับค่ามาตรฐานโลหะหนักในดินตะกอนทะเลนั้น เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีค่ามาตรฐานนี้ แต่เป็นเกณฑ์พื้นฐานการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอีกหลายเกณฑ์ ส่วนค่ามาตรฐานคุณภาพดินตะกอนของต่างประเทศได้แก่ประเทศสหรัฐอเมริกา ฮองกง ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ (สทช., 2555) เป็นค่ามาตรฐานคุณภาพดินตะกอนสำหรับแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเล แสดงรายละเอียดดังตารางผนวกที่ 3 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทยพบว่าโลหะหนักที่มีค่ามากกว่าค่าเกณฑ์พื้นฐานนั้น ได้แก่ โครเมียม นิกเกิล แคดเมียม ตะกั่ว โดยพบว่ามีค่าเกินค่าเกณฑ์พื้นฐานมากและมีค่าเกินในทุกๆจุดเก็บตัวอย่างและทุกฤดูกาล ส่วนทองแดงมีค่ามากกว่า

ค่าเกณฑ์พื้นฐานนั้นข้างเป็นบางจุด ในขณะที่สังกะสี มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์พื้นฐานนั้น ส่วนแมงกานีสและเหล็ก ไม่ได้มีการกำหนดค่าเกณฑ์พื้นฐานสำหรับธาตุสองชนิดนี้ไว้ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินตะกอนสำหรับแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเล ของประเทศต่างๆ พบว่าปริมาณโลหะหนักทุกชนิดมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานนั้น

นอกจากชนิดของโลหะหนักและลักษณะพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างที่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักแล้ว ขนาดอนุภาคและปริมาณอินทรีย์วัตถุก็มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนด้วยเช่นกันเนื่องจากโลหะหนักส่วนใหญ่จะยึดเกาะหรือดูดซับกับดินตะกอนที่มีขนาดอนุภาคละเอียด ได้แก่ อนุภาคดินเหนียวและทรายแป้ง ได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เช่น ทราย เพราะดินตะกอนขนาดอนุภาคละเอียดนั้นมีโครงสร้างเป็นอนุมิโนซิลิเกต หรือที่เรียกว่าแร่ดินเหนียว ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีช่องว่างและพื้นที่ผิวมาก อีกทั้งยังมีประจุทำให้สามารถสร้างพันธะกับสารอินทรีย์และโลหะหนักได้มาก ขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นซิลิเกตหรือที่เรียกว่า ควอทซ์ ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนก็จะมีผลโดยตรงกับปริมาณการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนเพราะอินทรีย์วัตถุมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบคีเลต สามารถรวมตัวกับโลหะหนัก เช่นสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและเกิดการตกตะกอน ทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลง (ณรงค์ฤทธิ์, 2547) แต่การดูดซับโลหะหนักของอินทรีย์วัตถุจะทำให้ดินตะกอนมีปริมาณโลหะหนักสูงขึ้น ทำให้โลหะหนักมีการสะสมในดินตะกอนเพิ่มขึ้น (ศิริมาศ, 2550)

สำหรับค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำทะเลในช่วงที่เก็บตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 11 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเค็ม อุณหภูมิ การนำไฟฟ้า และออกซิเจนละลายน้ำ แต่ละฤดูกาลมีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยในฤดูฝนมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ น้อยกว่าฤดูหนาวและฤดูร้อน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อปริมาณของโลหะหนักในดินตะกอน เพราะในสภาพที่เป็นด่าง การตกตะกอนของโลหะหนักจำพวกสังกะสี ทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว ปรอท และจะเกิดได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้มีการสะสมในดินตะกอนได้มาก โลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียมในดินตะกอนสามารถปลดปล่อยออกสู่แหล่งน้ำได้อีกเมื่อความเค็มของน้ำเพิ่มขึ้น เพราะทำให้เกิดการคาย ส่วนโลหะหนักชนิดอื่นเช่น ทองแดงจะจับกับสารประกอบอินทรีย์กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้มาก นอกจากนี้ ความเป็นกรด - ด่างของน้ำ อุณหภูมิ ความกระด้างของน้ำ ปริมาณออกซิเจนในน้ำ ล้วนมีผลต่อการสะสมของทองแดงทั้งสิ้น (ศิริมาศ, 2550)

ความสัมพันธ์ระหว่างนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีกับปริมาณ โลหะหนักในดินตะกอน

ความสัมพันธ์ของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีกับปริมาณ โลหะหนัก มีความซับซ้อนเพราะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลและการเปลี่ยนแปลงทางภูมิศาสตร์ (El-Taher and Madkour, 2011) และเนื่องจากผลการวิเคราะห์โลหะหนักในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงยากที่จะอธิบายความสัมพันธ์ของโลหะหนักและนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ยของโลหะหนักในดินตะกอน

จุดเก็บตัวอย่าง	โลหะหนักในดินตะกอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)								
	โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล	แคดเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	ทองแดง	ปรอท	ตะกั่ว
1.	564	37	103	18	253	6,794	21	73	203
2.	652	57	115	26	214	5,163	83	65	136
3.	888	63	76	30	221	11,940	91	67	83
4.	496	35	125	15	162	6,409	37	93	95
5.	656	70	70	28	303	7,487	144	80	222
6.	367	44	92	18	161	7,020	24	64	132
7.	699	36	106	18	159	4,451	23	61	147
8.	239	25	119	36	145	2,786	17	60	188
9.	195	25	68	30	75	4,491	15	60	70
10.	353	35	113	23	472	7,572	19	61	141

ตารางที่ 11 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำทะเลในวันที่เก็บตัวอย่าง

ครั้งที่	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเค็ม (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)
1. ฤดูฝน	7.1±0.3	23.8±5.8	27.5±8.4	37.7±8.2	4.9±0.9
2. ฤดูหนาว	7.8±0.4	24.0±6.1	28.5±1.8	41.4±9.7	5.4±1.5
3. ฤดูร้อน	7.6±0.4	29.5±0.3	28.1±1.8	45.1±1.7	5.8±0.8

## 5. ผลการวิเคราะห์ชนิดของสัตว์หน้าดินที่อยู่ในดินตะกอน

ผลการวิเคราะห์สัตว์หน้าดินทั้งสามฤดูกาลแสดงดังตารางที่ 12 พบสัตว์หน้าดิน 4 ไฟลัม ประกอบด้วย ไฟลัมแอนนิลิดา 16 ชนิด ไฟลัมอาร์โทรพอดา 7 ชนิด ไฟลัมมอลลัสกา 19 ชนิด และ ไฟลัมเอชินีโคเดอริมาตา 2 ชนิด รวม 44 ชนิด โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

### 1. ครั้งที่ 1 ฤดูฝน

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างสัตว์หน้าดินครั้งที่ 1 พบสัตว์หน้าดินจำนวน 3 ไฟลัม ประกอบด้วย ไฟลัมแอนนิลิดา อาร์โทรพอดา และมอลลัสกา มีอยู่ในช่วง 45-979 ตัวต่อตารางเมตร

### 2. ครั้งที่ 2 ฤดูหนาว

การวิเคราะห์ตัวอย่างสัตว์หน้าดินครั้งที่ 2 พบสัตว์หน้าดินจำนวน 4 ไฟลัม ประกอบด้วย ไฟลัมแอนนิลิดา อาร์โทรพอดา มอลลัสกา และเอชินีโคเดอริมาตา มีปริมาณอยู่ในช่วง 45-4,447 ตัวต่อตารางเมตร

### 3. ครั้งที่ 3 ฤดูหนาว

การวิเคราะห์ตัวอย่างสัตว์หน้าดินครั้งที่ 3 พบสัตว์หน้าดินจำนวน 4 ไฟลัม ได้แก่ ไฟลัมแอนนิลิดา อาร์โทรพอดา มอลลัสกา และเอชินีโคเดอริมาตา มีปริมาณ 45-2,804 ตัวต่อตารางเมตร

จากผลการวิเคราะห์ชนิดของสัตว์หน้าดินที่แสดงดังตารางที่ 11 ปริมาณสัตว์หน้าดินทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 45-4,447 ตัวต่อตารางเมตร และมีค่าดัชนีความหลากหลายอยู่ในช่วง 0-2.2 ซึ่งค่าดัชนีความหลากหลาย หมายถึง ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของสัตว์ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำแต่ละแห่ง ในกรณีที่สภาพแวดล้อมเหมาะสมค่าดัชนีจะสูง แสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมนั้นมีสัตว์หน้าดินอาศัยอยู่มากชนิด แต่ละชนิดจะมีจำนวนใกล้เคียงกัน ในกรณีที่สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมค่าดัชนีจะต่ำ แสดงว่าในแหล่งน้ำนั้นมีสัตว์หน้าดินอยู่น้อยชนิดและปริมาณของสัตว์หน้าดินแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกันมาก (บังอร, 2539)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจุดที่พบชนิดและการแพร่กระจายของสัตว์หน้าดินมากที่สุด ได้แก่ จุดที่ 8 (กัปตันยุทธ) จุดที่ 9 (บางแสน) จุดที่ 1 (ปราสาทสังฆกรรม) และจุดที่ 10 (อ่างศิลา) ตามลำดับ พบสัตว์หน้าดินจำนวน 15, 14, 13 และ 12 ชนิดตามลำดับ ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนจุดเก็บตัวอย่างที่มีการแพร่กระจายของชนิดและปริมาณสัตว์หน้าดินน้อยที่สุด ได้แก่ จุดที่ 2 (บ้านพักคนชรา) โดยพบเพียง 2 ชนิดเท่านั้นและมีปริมาณน้อยกว่าจุดอื่นๆ ด้วย สัตว์หน้าดินที่พบส่วนใหญ่เป็นกลุ่มไส้เดือนทะเล กุ้ง ปู หอยฝาเดียว หอยสองฝา ปลิงทะเลและดาวเปราะ ซึ่งกลุ่มของไส้เดือนทะเลและหอย จะพบการกระจายเกือบทุกสถานีและมีจำนวนชนิดมากกว่ากลุ่มสัตว์อื่นๆ เนื่องจากมีความทนทานต่อสภาวะมลพิษสูงกว่าสัตว์กลุ่มอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบกลุ่มสัตว์เศรษฐกิจบางชนิด ได้แก่ ปูม้า (*Portunus pelagicus*) และ กุ้งแชบ๊วย (*Penaeus merguensis*) เป็นต้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ จำลอง (2546) ที่ศึกษาองค์ประกอบชนิดสัตว์ทะเลหน้าดินบริเวณอ่าวศรีราชา จังหวัดชลบุรี พบทั้งหมด 9 กลุ่มใหญ่ โดยกลุ่มไส้เดือนทะเลเป็นสัตว์ทะเลหน้าดินที่พบเด่น รองลงมาคือหอยและครัสเตเชียน คิดเป็นร้อยละ 57.60, 31.27 และ 9.60 ของจำนวนสัตว์ทะเลหน้าดินทั้งหมด และการศึกษาสัตว์ทะเลหน้าดินบริเวณชายฝั่งแหลมฉบังถึงอ่าวพัทยาของ สมถวิล และวิญญิต (2534) พบว่ากลุ่มเด่นเป็นพวกไส้เดือนทะเลซึ่งพบถึง ร้อยละ 77.50 ของสัตว์ทะเลหน้าดินทั้งหมด รองลงมาเป็นพวกครัสเตเชียนและหอย เท่ากับร้อยละ 13.16 และ 2.25 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงความหลากหลายทั้งชนิดและปริมาณของสัตว์หน้าดินนั้น พบว่ามีความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นอีกหลายอย่าง ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ เพราะเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์หน้าดิน สัตว์หน้าดินบางชนิดสามารถพบได้มากในบริเวณที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมาก แต่ในทางกลับกันสัตว์หน้าดินบางชนิดมักพบได้ในบริเวณที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่น้อยกว่า และชนิดของสัตว์หน้าดินจะมีความแตกต่างกันตามสภาพพื้นที่ และขนาดอนุภาคของดินตะกอนด้วย (จำลอง, 2546)

#### ความสัมพันธ์ระหว่างนิเวโคโลจี้กัมมันตรังสีกับชนิดของสัตว์หน้าดิน

จากผลการวิเคราะห์ชนิดของสัตว์หน้าดินในตัวอย่างดินตะกอนนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างนิเวโคโลจี้กัมมันตรังสีกับชนิดของสัตว์หน้าดิน ไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน เพราะในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำสัตว์หน้าดินมาวิเคราะห์หิวนิวโคโลจี้กัมมันตรังสี เนื่องจากสัตว์หน้าดินที่เก็บมาได้มีจำนวนน้อยมากจึงไม่เพียงพอที่จะนำมาวิเคราะห์หิวนิวโคโลจี้กัมมันตรังสี

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสัตว์หน้าดินนั้นมีทั้งชนิดที่อยู่บนพื้นผิวดินและที่ขุดรูอยู่ในดิน และอาศัยการกินอาหารจากสิ่งที่อยู่ในดินเป็นหลัก ย่อมทำให้เกิดการถ่ายทอดหรือเกิดการดูดซับเอาสารมลพิษต่างๆที่อยู่ในดินตะกอนไปไว้ในตัวของสัตว์หน้าดินเองได้ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่ามักมีการใช้สัตว์หน้าดินเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของน้ำและดินตะกอนในบริเวณนั้นๆ



ตารางที่ 12 ผลการจำแนกสัตว์หน้าดินในตัวอย่างดินตะกอนทั้งสามฤดูกาล

จุดเก็บตัวอย่าง	ครั้งที่	Phylum	Taxa	Total Quantity (ind./m <sup>2</sup> )	Diversity Index
1. ปราสาทสังขรรม	1	1.Annelida, 2.Arthropoda	1.Nereidae, Magelonidae, 2.Tanaid	313	1.0
	2	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca	1.Nereis sp. ,Polychaete, 2. Amphipod , 3.Nuculana sp.	313	1.3
	3	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca, 4.Echinodermata	1.Magelonidae, Maldanidae, 2.Amphipod, 3.Calyptrea sp., Monilea sp., Nuculana sp., Rhinoclavis sp., Timoclea sp., 4.Ophiotrix sp.	894	1.9
2. บ้านพักคนชรา	1	Mollusca	<i>Meretrix , meretrix</i>	45	0
	2	Arthropoda	<i>Diogenes sp.</i>	45	0
	3	Mollusca	<i>Meretrix meretrix</i>	45	0
3. หัวแหลมฉับัง	1	1.Annelida, 2.Arthropoda,3.Mollusca	1.Magelonidae, 2.Amphipod, 3.Timoclea sp.	135	1.1
	2	1.Annelida, 2.Arthropoda	1.Nereidae, Polychaete, 2.Amphipod, Crab	180	1.4
	3	1.Annelida, 2.Arthropoda,3.Echinodermata	1.Magelonidae, 2. Crab, 3. <i>Ophiotrix</i> sp.	135	1.1
4. สะพานแก้วเสอ โซ	1	1.Annelida, 2.Mollusca	1.Magelonidae, Paraonidae, 2. <i>Tellina</i> sp.	268	1.0
	2	Annelida	Eunicidae, <i>Nereis</i> sp. , Sigalionidae	446	0.9

ตารางที่ 11 (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง	ครั้งที่	Phylum	Taxa	Total Quantity (ind./m <sup>2</sup> )	Diversity Index
4. สะพานแก๊สเอสโซ	3	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Echinodermata	1.Capitellidae, Magelonidae, <i>Nereis</i> sp., Paraonidae, 2.Amphipod, 3. <i>Holothuria</i> sp.	1,647	0.8
5. สะพานไซโล	1	1.Arthropoda, 2.Mollusca	1. <i>Diogenes</i> sp., <i>Penaeus merguensis</i> , 2. <i>Timoclea</i> sp.	223	1.1
	2	1.Annelida, 2.Arthropoda	1. <i>Nereis</i> sp., <i>Ophelina</i> sp., Polychaete 2.Amphipod, <i>Diogenes</i> sp.	4,447	0.8
	3	1.Annelida, 2.Mollusca	1.Magelonidae, 2. <i>Tellina</i> sp., <i>Timoclea</i> sp.	268	0.9
6. สถานีวิจัยประมงฯ	1	1.Annelida, 2.Arthropoda	1.Paraonidae, 2.Amphipod	134	0.6
	2	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca	1.Nereidae, Paraonidae, 2.Amphipod, 3. <i>Tellina</i> sp.	357	1.3
	3	1.Annelida, 2.Arthropoda	1.Magelonidae, Nereidae, Paraonidae, 2.Amphipod	224	1.3
7. บางพระ	1	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca	1.Nereidae, 2. <i>Diogenes</i> sp., 3. <i>Nassaria</i> sp.	979	0.7
	2	1.Arthropoda, 2.Mollusca	1. <i>Diogenes</i> sp., 2. <i>Anomalocardia</i> sp.	179	0.6
	3	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca	1.Eunicidae, Glyceridae, Goniadidae, Maldanidae, Nereidae, Onuphidae, Sabellidae, Syllidae, 2.Amphipod, <i>Diogenes</i> sp., 3. <i>Clypeomorus</i> sp., <i>Tellina</i> sp., <i>Timoclea</i> sp.	2,494	2.2

ตารางที่ 11 (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง	ครั้งที่	Phylum	Taxa	Total Quantity (ind./m <sup>2</sup> )	Diversity Index
8. กัปตันยุทธ	1	1.Annelida, 2.Arthropoda,3.Mollusca	1.Nereidae,2.Amphipod,3. <i>Anomalocardia</i> sp. , <i>Cerithium</i> sp. , <i>Musculista senhousia</i>	624	1.5
	2	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca	1. <i>Nereis</i> sp., 2.Amphipod, 3. <i>Anomalocardia</i> sp., <i>Antigona</i> sp., <i>Lucina</i> sp.	936	1.1
	3	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Mollusca	1.Eunicidae, Nereidae, 2. Amphipod, Crab, 3. <i>Anomalocardia</i> sp., <i>Arcuatula arcuatula</i> , <i>Clithon faba</i> , <i>Gafrarium</i> sp., <i>Vittina</i> sp.	2,804	1.5
9. บางแสน	1	1.Annelida, 2.Mollusca	1.Magelonidae, Nereidae, 2. <i>Dosinia</i> sp. , <i>Timoclea</i> sp.	180	1.4
	2	1.Annelida, 2.Arthropoda, 3.Echinodermata	1. <i>Nereis</i> sp., Polychaete, Syllidae, Terebellidae, 2. <i>Portunus pelagicus</i> , Shrimp, 3. <i>Ophiotrix</i> sp.	1,249	1.6
	3	1.Annelida, 2.Mollusca	1.Glyceridae, 2. <i>Tellina</i> sp., <i>Timoclea</i> sp.	357	1.0
10. อ่างศิลา	1	Annelida	Onuphidae	267	0
	2	Annelida	Eunicidae, <i>Nereis</i> sp.	90	0.7
	3	Annelida	Glyceridae, Paraonidae, Polychaete	446	0.8

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. จากการตรวจวัดระดับกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนบน จังหวัดชลบุรี ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ หัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ไม่พบนิวไคลด์กัมมันตรังสีซีเซียม-137 แต่พบนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติได้แก่ ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 และโพแทสเซียม-40 โดยส่วนใหญ่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะมากกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR แต่การประเมินค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติพบว่ายังอยู่ในระดับที่ปลอดภัย

2. การศึกษาผลของฤดูกาล ขนาดอนุภาค ปริมาณอินทรีย์วัตถุและปริมาณโลหะหนักต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน สรุปได้ดังนี้

2.1 ฤดูกาลไม่มีผลต่อการสะสมของยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 แต่มีผลต่อการสะสมของโพแทสเซียม-40 ในดินตะกอน โดยปริมาณโพแทสเซียม-40 ที่พบเรียงลำดับจากมากไปน้อยตามฤดูกาลดังนี้ ฤดูหนาว > ฤดูร้อน > ฤดูฝน เนื่องจากปริมาณน้ำฝนและทิศทางลมมรสุมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่ง

2.2 ขนาดอนุภาคมีผลต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค พบว่าเป็นกลุ่มดินเนื้อหยาบ มีผลทำให้โพแทสเซียม-40 และซีเซียม-137 สะสมได้น้อย เพราะเป็นนิวไคลด์ที่สามารถถูกดูดซับได้ดีในอนุภาคที่มีขนาดเล็กจำพวกแร่ดินเหนียว จึงไม่พบซีเซียม-137 ในขณะที่ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 จะมีความสัมพันธ์กับอนุภาคที่เป็นแร่หนักซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาคราย ซึ่งเป็นสัดส่วนอนุภาคที่มีมากที่สุดของตัวอย่างดินตะกอนของงานวิจัยนี้ ดังนั้นนิวไคลด์ทั้งสองชนิดนี้จึงสะสมในดินตะกอนได้มาก ทำให้มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะมากกว่าค่าเฉลี่ยของ UNSCEAR

2.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีผลต่อการสะสมนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับประเมินปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินของกรมพัฒนาที่ดินพบว่าทุกจุดมีค่าต่ำถึงต่ำมาก เพราะตัวอย่างดินตะกอนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่จึงมี

ปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อย โดยนิเวศโลดักัมมันตรังสีที่มีโอกาสทำปฏิกิริยาได้มากและมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณอินทรีย์วัตถุคือโพแทสเซียม-40 และซีเซียม-137

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนและในสัตว์หน้าดินในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถอ้างอิงถึงความสัมพันธ์กับการสะสมนิเวศโลดักัมมันตรังสีได้อย่างชัดเจน เนื่องจากชนิดของธาตุโลหะหนักที่วิเคราะห์กับธาตุของนิเวศโลดักัมมันตรังสีที่ตรวจพบนั้นต่างชนิดกัน อีกทั้งยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องอีกหลายประการ นอกจากนี้การวิเคราะห์ชนิดของสัตว์หน้าดินก็ไม่สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์นั้นได้เช่นกัน เพราะไม่ได้วิเคราะห์นิเวศโลดักัมมันตรังสีในตัวอย่างสัตว์หน้าดิน

#### ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

1. ควรทำการศึกษาการสะสมนิเวศโลดักัมมันตรังสีในส่วนอื่นๆเพิ่มเติมนอกจากดินตะกอน เช่น ในน้ำทะเล สัตว์ทะเล สัตว์หน้าดิน แพลงก์ตอน สาหร่าย หรือพืชน้ำจืด เป็นต้น
2. ควรเพิ่มพื้นที่ในการศึกษามากขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมบริเวณพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทยตอนบนทั้งหมด
3. ควรมีการศึกษาถึงการสะสมในชั้นดิน โดยการเก็บตัวอย่างแบบกระบอกเจาะ เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงการสะสมในชั้นดินต่างๆได้อย่างชัดเจน
4. ตัวอย่างดินตะกอนที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นตัวอย่างที่เก็บก่อนการเกิดเหตุการณ์อุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะ ประเทศญี่ปุ่น ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เปรียบเทียบผลกระทบจากอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ หากได้ทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนในจุดเดียวกันมาวิเคราะห์นิเวศโลดักัมมันตรังสีต่อไปในอนาคต

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2546. สถานการณ์โลหะหนักในตะกอนดินและเนื้อเยื่อสัตว์น้ำบริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร

กรมทรัพยากรชายฝั่งและทะเล. 2554. แผนที่ทะเลอ่าวไทย ชายฝั่งจังหวัดชลบุรี. แหล่งที่มา <http://www.dmcr.go.th/marinecenter/erosion-chonburi.php>, 8 กันยายน 2554.

กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2515. ชุดแผนที่สำรวจดินระดับจังหวัด.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2544. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

จิรารัตน์ เรียมเจริญ, จงกล บุญครองชีพ, วิชาญ ชูสุวรรณ และ เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล. 2551. คุณภาพน้ำและตะกอนดินอ่าวปากพนังและบริเวณนอกปากทะเลสาบสงขลา ฉบับที่ 24. ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทยตอนล่าง กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สงขลา.

จำลอง โตอ่อน. 2546. โครงสร้างประชาคมสัตว์ทะเลหน้าดินบริเวณอ่าวศรีราชา จังหวัดชลบุรี. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ 2 (3): 213-232.

ชยาภาส ทับทอง และสินศุภา จุ้ยจุลเจิม. 2548. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัย เรื่อง การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยเปลือกหอย. 42 หน้า

ชุติมา ตันติภักดี และจรมัน ว่องวิทย์. 2531. สัตว์ผิวดินในบ่อเลี้ยงกุ้ง. วารสารสงขลานครินทร์ 10 (3): 329-338.

ชุติมา ขมวิสัย. 2540. การแพร่กระจายและศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดินโดยใช้เดือนทะเลบางชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณรงค์ฤทธิ์ เลิศเกษตรวิทยา. 2547. การศึกษาประวัติการสะสมของทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว  
ในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิคม ประเสริฐเชิวชาญ. 2551. จลนพลศาสตร์การสะสมของปรอท-203 ซีเซียม-134  
สตรอนเชียม-85 สังกะสี-65 โคบอลต์-57 และโครเมียม-51 ในหอยแครง (*Anadara  
granosa*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐรัตน์ ปภาวสิทธิ์, รุติมา ทองศรีพงษ์ และอัจฉราภรณ์ เปี่ยมสมบูรณ์. 2542. โครงสร้าง  
ประชากรสัตว์ทะเลหน้าดินบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรี : ผลกระทบจากการเลี้ยงกุ้ง.  
โครงการศึกษาวิจัยเพื่ออนุรักษ์พัฒนาและติดตามการใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติชาย  
เลน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ. 2548. การสอบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาแบบเจอร์มานเนียม  
บริสุทธิ์สูงชนิดเพลนนา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บังอร แฉวนอนจิว. 2539. คุณภาพน้ำ ชนิดและปริมาณของสัตว์หน้าดินในแม่น้ำแม่กลอง.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปริทัศน์ เจริญสิทธิ์. 2550. การสำรวจพื้นที่กีดขวางชายฝั่งทะเลในฤดูมรสุม บริเวณอ่าวไทยฝั่ง  
ตะวันตก ตั้งแต่จังหวัดชุมพรถึงจังหวัดปัตตานี ระหว่างเดือนธันวาคม 2549 - มกราคม  
2550. เอกสารเผยแพร่สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ฉบับที่ 28. กรม  
ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ปรีดา นวลจริง. 2549. กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยทักษิณ.

เผด็จ สัจจันทร์. 2548. ที่ดินชายทะเลและพื้นที่ชายฝั่งทะเล. เอกสารเผยแพร่ ฉบับที่ 4  
ส่วนจัดการที่ดินชายฝั่ง. สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กรมทรัพยากรทาง  
ทะเลและชายฝั่ง. 123 หน้า.

พัชรี ชีวจินดาจร. 2550. การวิเคราะห์ดินทางเคมี. ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

มนูวดี หังสพฤกษ์. 2532. สมุทรศาสตร์เคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร. 329 หน้า

เริงชัย ต้นสกุล. 2538. ผลกระทบการทำนาแก่งต่อคุณภาพน้ำชายฝั่งและระบบนิเวศบางประการ ของจังหวัดสงขลาและจังหวัดนครศรีธรรมราช. ใน การสัมมนาป่าชายเลนครั้งที่ 9 "การอนุรักษ์ป่าชายเลนเพื่อสังคมไทยในศตวรรษหน้า". 6-9 กันยายน จังหวัดภูเก็ต คณะกรรมการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

วีระวงศ์ ตางาม. 2543. การศึกษาปริมาณโลหะหนักบางชนิดในน้ำ ดินตะกอนและเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของปลาบางชนิดในแม่น้ำและคลองรอบเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรากร ไม้เรียง, จิรพัฒน์ โชติกไกร และประทีป ดวงเดือน. 2525. ปฐพีกลศาสตร์: ทฤษฎีและปฏิบัติการ. พิมพ์ครั้งที่ 3. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์, กรุงเทพมหานคร.

ศรีบุญญา วงษ์สนิท. 2553. ปริมาณรังสีรวมแอลฟาและบีตาในตัวอย่างน้ำทะเล ตะกอนดินและแพลงตอนจากบริเวณระบบนิเวศชายฝั่งอ่าวไทยตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริมาศ สิทธิกรม. 2550. การแพร่กระจายของปริมาณแคดเมียม ทองแดงและตะกั่วในดินตะกอน บริเวณอ่าวตราด จังหวัดตราด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมถวิล จริตควาร และวิภูษิต มั่นทะจร. 2534. สัตว์ทะเลหน้าดินและสภาวะแวดล้อมบางประการ บริเวณพืชมืดทำเทียมเรือแหลมฉบัง. รายงานฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

- สร้อยญา สว่างชาติ. 2544. ปริมาณโลหะหนักบางชนิดในน้ำบริเวณป่าชายเลนที่รับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรินทร สะตะ. ม.ป.ป. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในแม่น้ำป่าสักจังหวัดสระบุรี. สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 7 อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี.
- โสวุฒิ ทองประจวบโชค. 2553. การศึกษาการจับถ่ายไอโอดีน-131 ทางปัสสาวะของผู้ปฏิบัติงานรังสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ส่วนธรณีวิทยาทางทะเล สำนักเทคโนโลยีธรณี กรมทรัพยากรธรณี (สทช). 2555. ธรณีวิทยาภาพถ่ายพื้นที่ทะเลอ่าวไทยตอนบน.
- Abdi, M. R., M. Kamali and S. Vaezifar. 2008. Distribution of radioactive pollution of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in northwestern coasts of Persian Gulf, Iran. **Marine Pollution Bulletin** 56: 751-757.
- Ahmet, C. 2008. An approximation for response function to  $\gamma$ -rays of NaI(Tl) detectors up to 1.5 MeV. **Applied Radiation and Isotopes**. 66: 1371-1376.
- Alloway, B. J. 1995. **Heavy metals in soils**. Chapman & Hall, Glasgow.
- Bartram, J. and R. Balance. 1996. **Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes**. Chapman & Hall, London.
- Boyd, C. E. 1995. **Bottom soils, sediment and pond aquaculture**. Chapman & Hall, New York.

- Buccolieri, A., G. Buccolieri, N. Cardellicchio, A. Dell'Atti, A. D. Leo and A. Maci. 2006. Heavy metals in marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy). **Marine Chemistry** 99: 227-235.
- Burnett, W. C., G. Wattayakorn, M. Taniguchi, H. Dulaiova, P. Sojisuporn, S. Rungsupa and T. Ishitobi. 2007. Groundwater-derived nutrient inputs to the Upper Gulf of Thailand. **Continental Shelf Research** 27: 176-190.
- Carter, M. R. 1993. **Soil sampling and methods of analysis**. Lewis publishers, Florida.
- Cheevaporn, V. and P. Menasveta. 2003. Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand. **Marine Pollution Bulletin** 47: 43-51.
- Claudio, B. and S. Annalisa. 1980. Efficiency Evaluation of Gamma Ray Solid State Detectors. **Nuclear Instruments and Methods**. 174:391-399.
- Combs, S. M. and M. V. Nathan. 1998. Soil organic matter, P. 53-58. *In* J.R. Brown, (ed.). **Recommended chemical soil test procedures for North Central region**. North Central Regional Research Publication, no. 221 (revised).
- Dugalic, G., D. Krstic, M. Jelic, D. Nikezic, B. Milenkovic, M. Pucarevic and T. Z. Skoric. 2010. Heavy metals, organics and radioactivity in soil of western Serbia. **Journal of Hazardous Materials** 177: 697-702.
- Dumat, C. L., H. Aquiquampoix and S. Staunton. 2000. Adsorption of Cesium by Synthetic Clay-Organic Matter Complexes: Effect of the Nature of Organic Polymers. **Environmental Science & Technology** 34: 2985-2989.

- EG&G ORTEC. 2001. **Modular Pulse-Processing Electronics and Semiconductor Radiation Detector Annual Catalog 95**. Instruments & Systems for Nuclear Spectroscopy, USA.
- Eikenberg, J., 2002. **Radium Isotope Systematics in Nature: Applications in Geochronology and Hydrogeochemistry**. M.S. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zürich.
- El-Taher, A. and H.A. Madkour. 2011. Distribution and environmental impacts of metals and natural radionuclides in marine sediments in-front of different wadies mouth along the Egyptian Red Sea Coast. **Applied Radiation and Isotopes** 69: 550-558.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1994. **Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry**. Method 200.7 Revision 4.4.
- Gilmore, G. and J.D. Hemingway. 2004. **Practical Gamma-Ray Spectrometry**. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1989. A Guidebook for Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. **Technical Report Series No. 295**. IAEA, Vienna.
- \_\_\_\_\_. 2003. Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis of radionuclides and trace elements. **IAEA-TECDOC-1360**. IAEA, Vienna.
- \_\_\_\_\_. 2010. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. **Safety reports series, no. 64**. IAEA, Vienna.

International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM). 2004. **International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM) 3<sup>rd</sup> Edition**. ISO VIM (DGUIDE 99999).

Kim Y., S. Cho, H. D. Kang, W. Kim, H. R. Lee, S. H. Doh, K. Kim, S. G. Yun, D. S. Kim, G. Y. Jeong. 2006. Radiocesium reaction with illite and organic matter in marine sediment. **Marine Pollution Bulletin** 52: 659–665.

Kim Y., K. Kim, H.D. Kang, W. Kim, S.H. Doh, D.S. Kim, B.K. Kim. 2007. The accumulation of radiocesium in coarse marine sediment: Effects of mineralogy and organic matter. **Marine Pollution Bulletin** 54: 1341–1350.

Knoll, F.G. 2000. **Radiation Detection and Measurement**. John Willey & Sons, New York.

Kubica B., W.M. Kwiatek, M. Stobiński, S. Skiba, M. Skiba, J. Gołaś, M. Kubica, M. Tuteja-Krysa, A. Wrona, R. Misiak, Z. Krzan. 2007. Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  Radionuclides and Some Heavy Metals in Soil Samples of Chochołowska Valley from Tatra National Park. **Polish J. of Environ. Stud** 16: 723-729.

Kurnaz, A., B. Kucukomeroglu, R. Keser, N. T. Okumusoglu, F. Korkmaz, G. Karahan and U. Cevik. 2007. Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Firtina Valley (Rize, Turkey). **Applied Radiation and Isotopes** 65: 1281-1289.

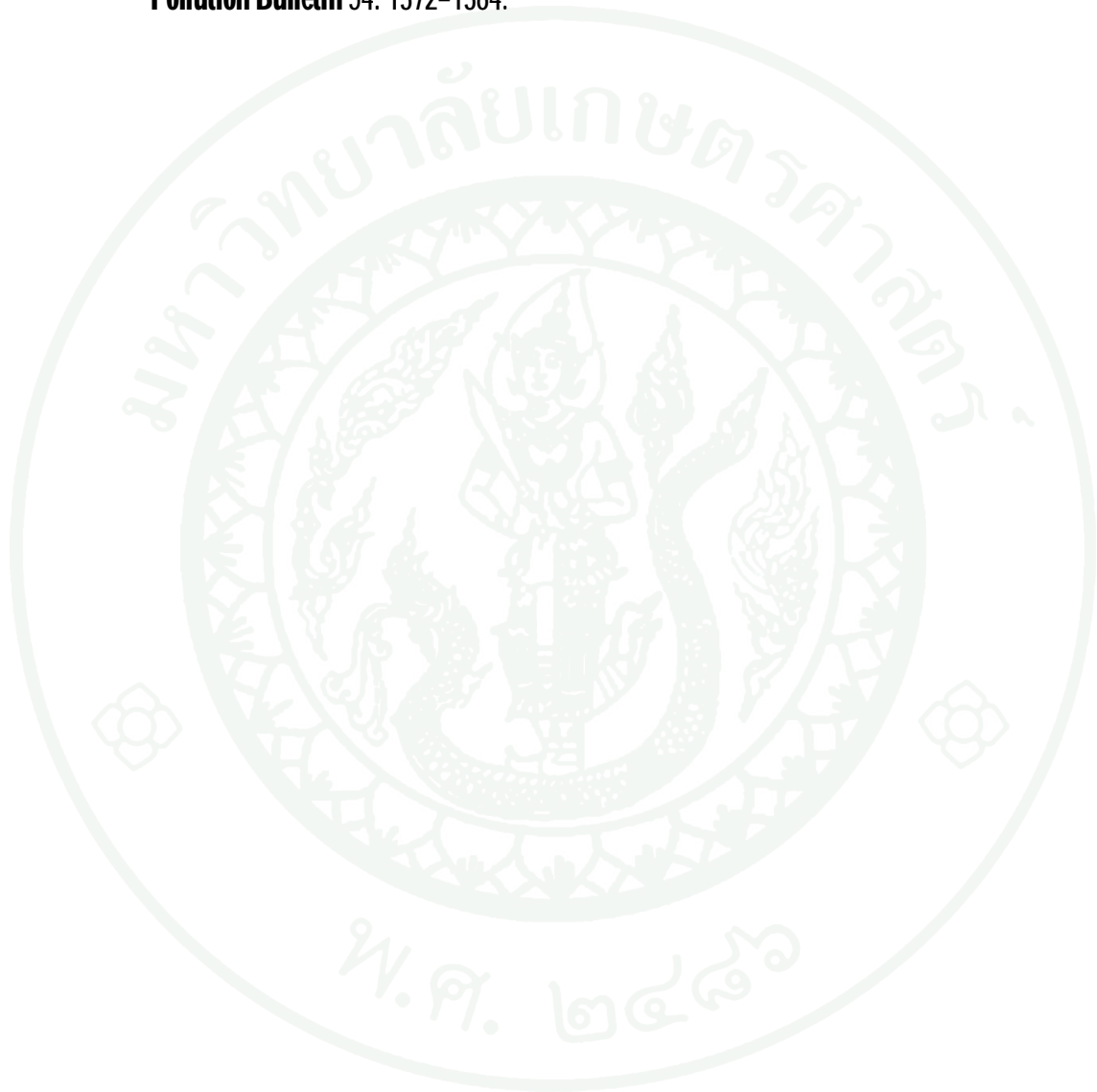
Lee, S. K., H. Wagiran, A. T. Ramli, N. H. Apriantoro, A. K. Wood. 2009. Radiological monitoring: terrestrial natural radionuclides in Kinta District, Perak, Malaysia. **Journal of Environmental Radioactivity** 100: 368–374.

Lewellen, T. 2008. Radiation detection and measurement. **Rad. Detect & Measure**.

- Ligero, R.A., I. Ramos-Lerate, M. Barrera, M. Casas-Ruiz. 2001. Relationships between sea-bed radionuclide activities and some sedimentological variables. **Journal of Environmental Radioactivity** 57: 7-19.
- Meksumpun, S., C. Meksumpun, A. Hoshika, Y. Mishima and T. Tanimoto. 2005. Stable carbon and nitrogen isotope ratios of sediment in the gulf of Thailand: Evidence for understanding of marine environment. **Continental Shelf Research** 25: 1905-1915.
- Noureddine, A., B. Baggoura, N. hocini and M. boulahdid. 1998. Uptake of Radioactivity by Marine Surface Sediments Collected in Ghazaouet, West Coast of Algeria. **Applied Radiation and Isotopes** 12: 1745-1748.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). 1979. **Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials**. Report by Group of Expert o the OECD Nuclear Energy Agency. Paris, France.
- Polphong, P., S. Mahapanyawong and N. Rativanich. 1984. **Radioactivity in sea water, sediments and living resources in the gulf of Thailand during 1981-1983**. Proceeding of the third seminar on the water quality and the quality of living Resources in Thai waters, National Research Council of Thailand, 26-28 March 1984.
- Rigol, A., M. Vidal and G. Rauret. 2002. Overview of the effect of organic matter on soil-radiocaesium interaction: implications in root uptake. **Journal of Environmental Radioactivity** 58: 191-216.
- Schumacher, B. A. 2002. **Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Soil and Sediments**. NCEA-C- 1282, EMASC-001, US. Environmental Protection Agency.
- Shirley, D. and W. Stanleye. 1983. **Statistics for Research**. John Wiley & Sons, Inc, Canada.

- Singh, S., A. Rani and R. K. Mahajan. 2005.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. **Radiation Measurements** 39: 431-439.
- Smith, E. P. 2002. Ecological statistics. **Encyclopedia of Environmetrics** 2: 589-602.
- Tsabarlis, C., G. Eleftheriou, V. Kapsimalis, C. Anagnostou, R. Vlastou, C. Durmishi, M. Kedhi and C.A. Kalfas. 2007. Radioactivity levels of recent sediments in the Butrint Lagoon and the adjacent coast of Albania. **Applied Radiation and Isotopes**. 65: 445-453.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2000. **Sources, effects and risk of ionizing radiation**. New York, United Nations.
- Veiga, R., N. Sanches, R.M. Anjos, K. Macario, M. Iguatemy, J.G. Aguiar, A.M.A. Santos, B. Mosquera, J. Bastos, C. Carvalho, M. B. Filho, N.K. Umisedo. 2006. Measurement natural radioactivity in Brazilian beach sands. **Radiation Measurements**. 41: 189-196.
- Xiang, Y., K. Wang, Y. Zhang, Z. Cao, J. Ye and H. Wang. 2007. Radioactivity monitoring in environmental water and air around QNPP. **Journal of Nuclear Science and Technique** 18: 316-320.
- Young, C.Y. 2003. Measurement of Escape Energy Form Absorber in Calorimetric Determination of Tr-192 Radioactivity. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**. 11: 388-391.
- Zhong, A., S. Guo, F. Li, G. Li and K. Jiang. 2006. Impact of anions on the heavy metals release from marine sediments. **Journal of Environmental Science** 18: 1216-1220.

Zhou, F., H. Guo and Z. Hao. 2007. Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts: A GIS-based chemometric approach. **Marine Pollution Bulletin** 54: 1372-1384.





ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก**  
ผลการหาเวลานับวัดที่เหมาะสม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง  
และผลการวัดนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน

## 1. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6

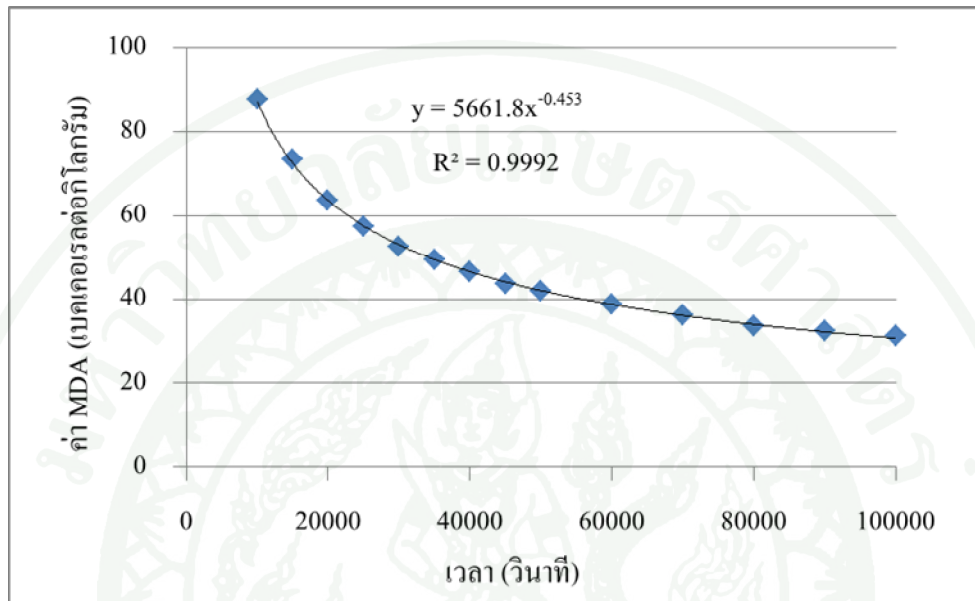
### ตารางผนวกที่ ก1 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเปรียบเทียบด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง IAEA Soil-6

นิวไคลด์	ช่องสัญญาณ	พลังงาน (กิโลอิเล็กตรอน โวลต์)	ค่ากัมมันตภาพ <sup>1</sup> (เบคเคอเรล ต่อกิโลกรัม)	ค่ากัมมันตภาพ <sup>2</sup> (เบคเคอเรล ต่อกิโลกรัม)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
เรเดียม-226	1157	186.21	79.92	78.95	1.61
ตะกั่ว-214	1837	295.21	79.92	78.95	0.60
ตะกั่ว-214	2188	351.92	79.92	78.95	0.51
บิสมัท-214	3787	609.31	79.92	78.95	0.29
ซีเซียม-137	4113	661.66	53.65	28.09	0.33
บิสมัท-214	4776	768.36	79.92	78.95	0.26
บิสมัท-214	5801	934.36	79.92	78.95	0.07
บิสมัท-214	6959	1,120.29	79.92	78.95	0.17
บิสมัท-214	7691	1,238.11	79.92	78.95	0.12
บิสมัท-214	10962	1,764.49	79.92	78.95	0.10

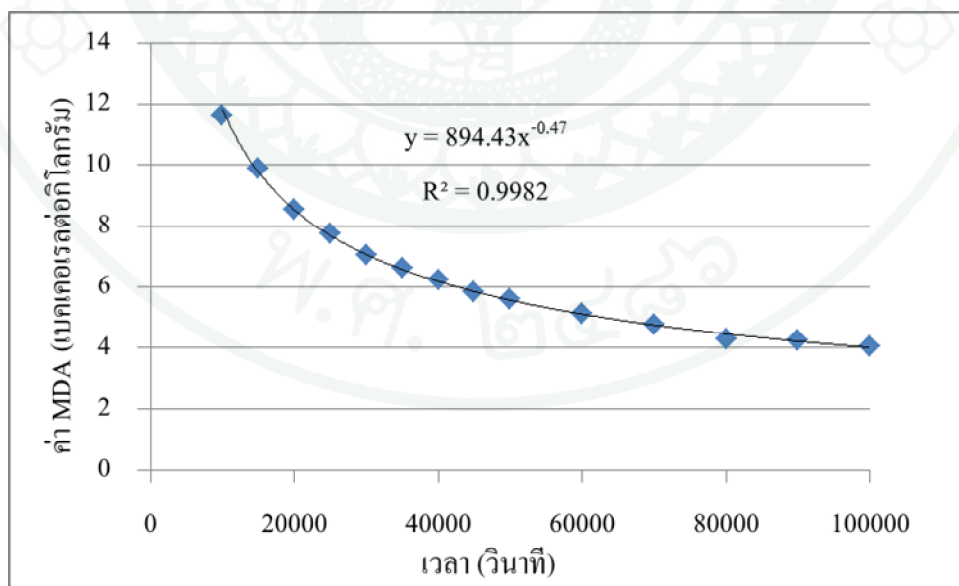
หมายเหตุ <sup>1</sup> = ค่ากัมมันตภาพเริ่มต้น (30 มกราคม 2526)

<sup>2</sup> = ค่ากัมมันตภาพ ณ วันที่วัด (22 กรกฎาคม 2554)

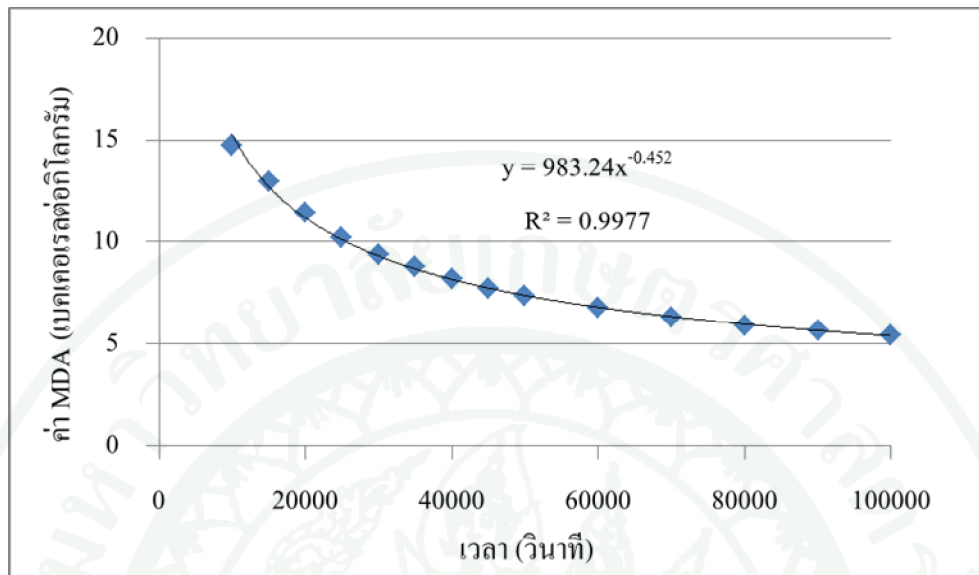
## 2. การหาเวลานับวัดที่เหมาะสม



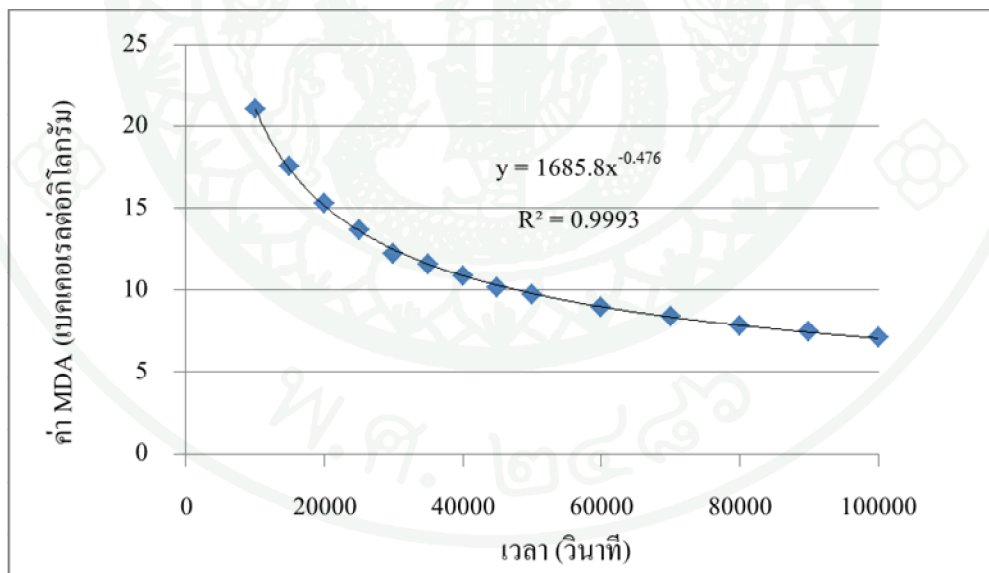
ภาพผนวกที่ 1 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับเรเดียม-226



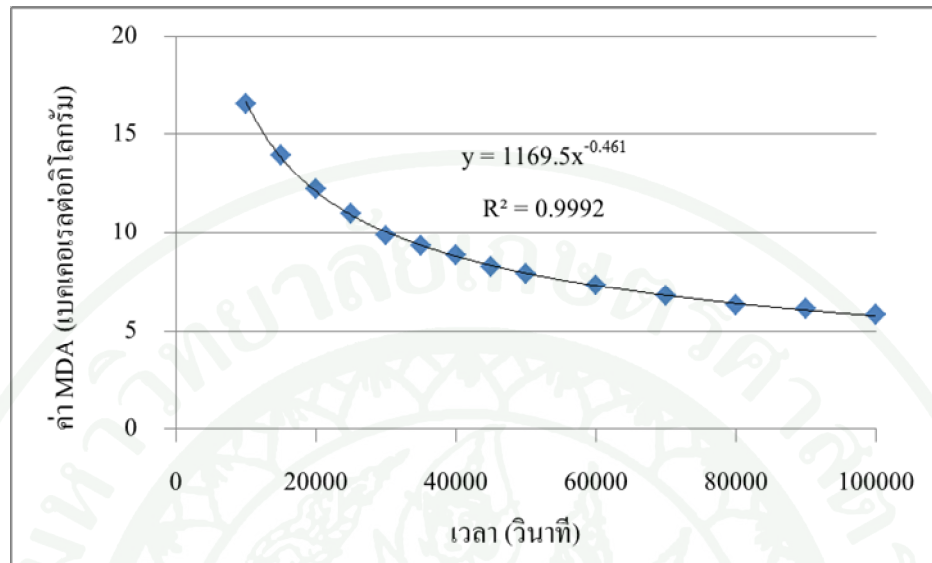
ภาพผนวกที่ 2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว-212



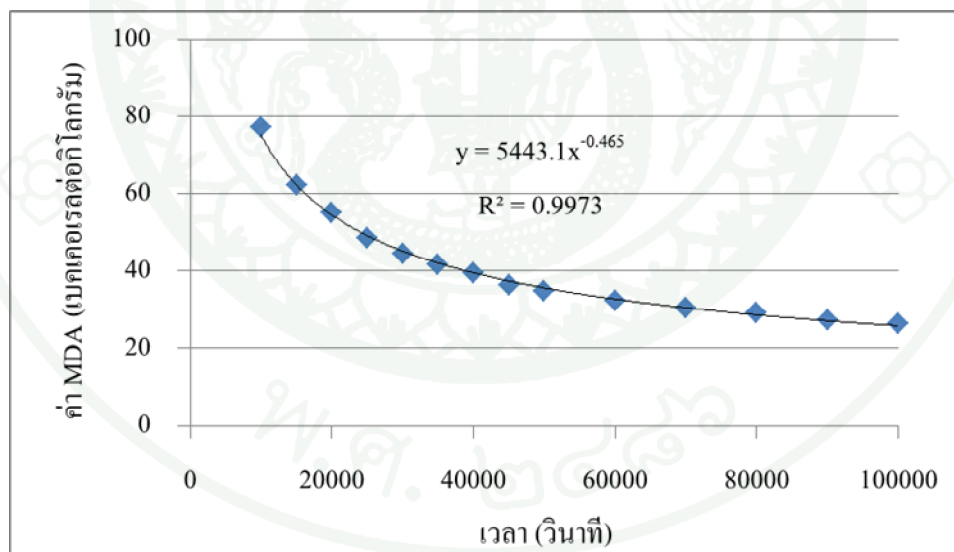
ภาพผนวกที่ 3 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว-214



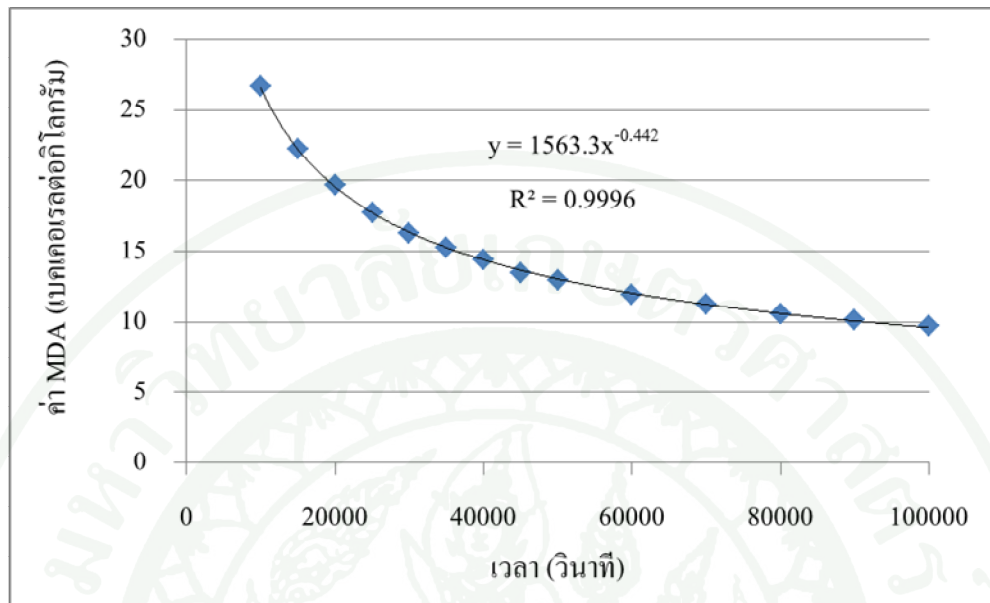
ภาพผนวกที่ 4 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับเทลเลียม-208



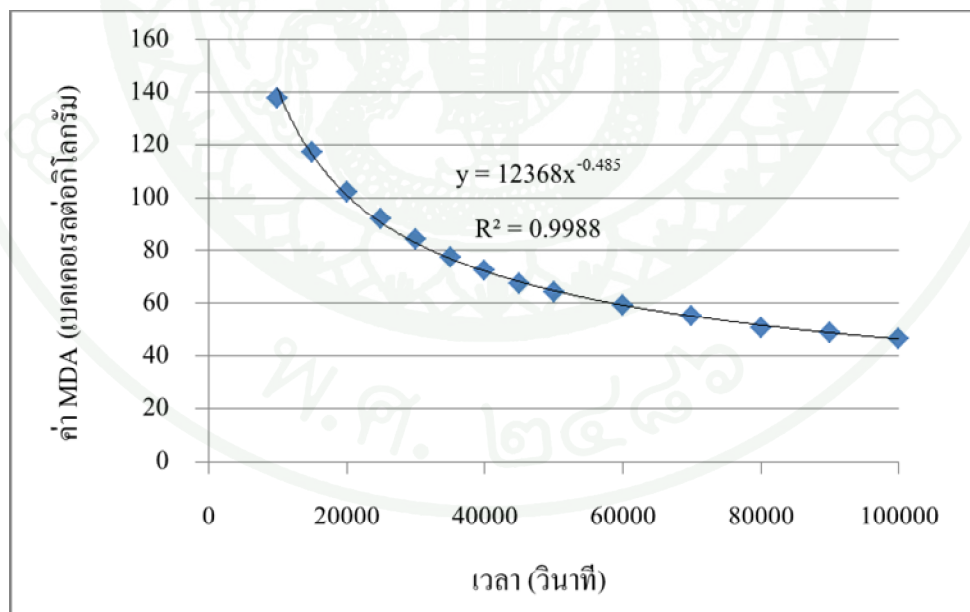
ภาพผนวกที่ 5 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับบิทัมส์-214



ภาพผนวกที่ 6 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับบิทัมส์-212



ภาพผนวกที่ 7 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับแอกติเนียม-228



ภาพผนวกที่ 8 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับโพแทสเซียม-40

### 3. ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนทั้ง 3 ฤดูกาล

#### ตารางผนวกที่ ก2 ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนครั้งที่ 1 (ฤดูฝน)

จุดเก็บตัวอย่าง	นิวไคลด์กัมมันตรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)				โพแทสเซียม-40
	ยูเรเนียม-238		ทอเรียม-232		
	ตะกั่ว-214	บิสมัท-214	แทลเลียม-208	แอกติเนียม-228	
1. ปราสาทสังฆกรรม	46	45	41	40	409
2. บ้านพักคนชรา	38	36	50	45	547
3. หัวแหลมฉับัง	38	35	45	38	287
4. สะพานแก๊สเอสโซ	27	21	26	29	151
5. สะพานไซโล	38	36	33	29	210
6. สถานีวิจัยประมงฯ	18	18	17	19	99
7. บางพระ	69	62	96	93	443
8. กัปตันยุทธ	132	123	205	211	986
9. บางแสน	17	11	11	18	977
10. อ่างศิลา	40	37	54	72	524

#### ตารางผนวกที่ ก3 ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนครั้งที่ 2 (ฤดูหนาว)

จุดเก็บตัวอย่าง	นิวไคลด์กัมมันตรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)				โพแทสเซียม-40
	ยูเรเนียม-238		ทอเรียม-232		
	ตะกั่ว-214	บิสมัท-214	แทลเลียม-208	แอกติเนียม-228	
1. ปราสาทสังฆกรรม	41	39	37	38	379
2. บ้านพักคนชรา	70	69	80	76	817
3. หัวแหลมฉับัง	48	42	59	47	381
4. สะพานแก๊สเอสโซ	27	24	27	33	153
5. สะพานไซโล	36	36	36	38	255
6. สถานีวิจัยประมงฯ	18	22	22	23	120
7. บางพระ	81	65	106	114	556
8. กัปตันยุทธ	22	22	23	26	649
9. บางแสน	23	15	22	16	954
10. อ่างศิลา	59	53	91	82	572

**ตารางผนวกที่ 4** ผลการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนครั้งที่ 3 (ฤดูร้อน)

จุดเก็บตัวอย่าง	นิวไคลด์กัมมันตรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)				โพแทสเซียม-40
	ยูเรเนียม-238		ทอเรียม-232		
	ตะกั่ว-214	บิสมัท-214	แทลเลียม-208	แอกติเนียม-228	
1. ปราสาทสังฆกรรม	83	67	66	58	401
2. บ้านพักคนชรา	42	42	47	52	700
3. หัวแหลมฉบบัง	40	42	53	45	366
4. สะพานแก๊สเอสโซ	36	30	38	35	184
5. สะพานไฮโด	14	17	13	15	1,017
6. สถานีวิจัยประมงฯ	20	19	21	27	132
7. บางพระ	29	31	34	43	481
8. กัปตันยุทธ	42	39	63	70	628
9. บางแสน	30	24	21	25	223
10. อ่างศิลา	70	62	87	97	589



**ภาคผนวก ข**

วิธีการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ และผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค  
ดินตะกอนทั้งสามฤดูกาล

## การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินตะกอนด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ (กรมวิชาการเกษตร, 2553)

### 1. การเตรียมสารละลายแคลกอนร้อยละ 5

ชั่งสาร ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> 36 กรัม และ Anhydrous sodium carbonate 8 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วเขย่าให้เข้ากัน

### 2. การวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์

ชั่งตัวอย่างดินตะกอนที่ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องหรืออบที่ 105 องศาเซลเซียส จำนวน 50 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมสารละลายแคลกอนร้อยละ 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร คนให้ตัวอย่างดินตะกอนทำปฏิกิริยากับสารละลาย แล้วตั้งทิ้งไว้ 20 นาที จากนั้นถ่ายสารละลายตัวอย่างลงใน dispersion cup ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 5 นาที แล้วถ่ายสารละลายตัวอย่างจาก dispersion cup ลงในกระบอกตกตะกอน (sedimentation cylinder) แล้วล้าง dispersion cup ด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในกระบอกตกตะกอน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดล่างของกระบอกตกตะกอนหรือที่ปริมาตร 1130 มิลลิลิตร นำไฮโดรมิเตอร์ออก แล้วใช้ plunger คนเป็นเวลา 30 วินาที โดยยกขึ้นเพื่อให้อนุภาคของดินในสารแขวนลอยกระจายอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงไปในกระบอกตกตะกอน โดยอย่าให้สารแขวนลอยได้รับความกระทบกระเทือนจากไฮโดรมิเตอร์ บันทึกค่าไฮโดรมิเตอร์ที่อ่านได้ และอุณหภูมิของสารแขวนลอยที่เวลา 40 วินาทีและ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และอนุภาคดินเหนียว (clay) นำไปเทียบกับไดอะแกรมสามเหลี่ยมมาตรฐาน เนื่องจากไฮโดรมิเตอร์จะเทียบกับมาตรฐานที่อุณหภูมิ 68 องศาฟาเรนไฮต์ ในการอ่านไฮโดรมิเตอร์ที่อุณหภูมิต่างไป 1 องศาฟาเรนไฮต์ จะทำให้ค่าที่อ่านได้เบี่ยงเบนไป 0.2 ดังนั้น

$$\text{ค่าแก้อุณหภูมิ (T}_c\text{)} = (T_f - 68) \times 0.2 \quad (25)$$

$$\text{ค่าแก้การอ่าน (R}_c\text{)} = R + (T_f - 68) \times 0.2 \quad (26)$$

$$\text{ค่าแก้ของ blank } (B_c) = B + (T_f - 68) \times 0.2 \quad (27)$$

เมื่อ  $T_f$  = อุณหภูมิของสารแขวนลอย (ฟาเรนไฮต์)  
 $R$  = ค่าของไฮโดรมิเตอร์ที่อ่านได้ในสารแขวนลอย  
 $B$  = ค่าของไฮโดรมิเตอร์ที่อ่านได้ใน blank

โดย %ทราย + %ทรายแป้ง + %ดินเหนียว = 100%

$$\text{ที่เวลา 40 วินาที } \% \text{ทรายแป้ง+ดินเหนียว} = \frac{R_{C(40S)} - B_c}{Wt.} \times 100 \quad (28)$$

$$\% \text{ทราย} = 100 - (\% \text{ทรายแป้ง+ดินเหนียว}) \quad (29)$$

$$\text{ที่เวลา 2 ชั่วโมง } \% \text{ดินเหนียว} = \frac{R_{C(7200S)} - B_c}{Wt.} \times 100 \quad (30)$$

$$\% \text{ทรายแป้ง} = (\% \text{ทรายแป้ง+ดินเหนียว}) - \% \text{ดินเหนียว} \quad (31)$$

เมื่อ  $R_{C(40S)}$  = ค่าแก้ของไฮโดรมิเตอร์ที่อ่านได้ในสารแขวนลอยที่เวลา 40 วินาที  
 $R_{C(7200S)}$  = ค่าแก้ของไฮโดรมิเตอร์ที่อ่านได้ในสารแขวนลอยที่เวลา 2 ชั่วโมง  
 $B_c$  = ค่าแก้ของไฮโดรมิเตอร์ที่อ่านได้ใน blank  
 $Wt.$  = น้ำหนักตัวอย่างดินตะกอน (กรัม)

เมื่อทราบค่าเปอร์เซ็นต์ดินทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว แล้วนำตัวเลขนี้ไปเปรียบเทียบกับ ไดอะแกรมสามเหลี่ยมสำหรับพิจารณาประเภทเนื้อดิน ก็จะทำให้ทราบว่าเป็นเนื้อดินชนิดใด

**ตารางผนวกที่ ข1** ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนครั้งที่ 1 (ฤดูฝน)

จุดเก็บตัวอย่าง	ชนิดอนุภาค			เนื้อดิน
	ทราย (ร้อยละ)	ทรายแป้ง (ร้อยละ)	ดินเหนียว (ร้อยละ)	
1. ปρασาทสังขรรม	87.00	8.00	5.00	ดินทรายร่วน
2. บ้านพักคนชรา	82.80	12.00	5.20	ดินทรายร่วน
3. หัวแหลมฉับัง	78.40	10.80	10.80	ดินร่วนทราย
4. สะพานแก๊สเอสโซ	81.40	12.80	5.80	ดินทรายร่วน
5. สะพานไซโล	83.40	11.80	4.80	ดินทรายร่วน
6. สถานีวิจัยประมงฯ	80.40	15.80	3.80	ดินทรายร่วน
7. บางพระ	89.40	5.80	4.80	ดินทราย
8. กัปตันยุทธ	86.60	7.80	5.60	ดินทรายร่วน
9. บางแสน	96.80	0.00	3.20	ดินทราย
10. อ่างศิลา	71.00	24.00	5.00	ดินร่วนทราย

**ตารางผนวกที่ ข2** ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนครั้งที่ 2 (ฤดูหนาว)

จุดเก็บตัวอย่าง	ชนิดอนุภาค			เนื้อดิน
	ทราย (ร้อยละ)	ทรายแป้ง (ร้อยละ)	ดินเหนียว (ร้อยละ)	
1. ปρασาทสังขรรม	84.2	9.8	6.0	ดินทรายร่วน
2. บ้านพักคนชรา	76.2	13.8	10.0	ดินร่วนทราย
3. หัวแหลมฉับัง	56.2	28.8	15.0	ดินร่วนทราย
4. สะพานแก๊สเอสโซ	78.2	16.0	5.8	ดินทรายร่วน
5. สะพานไซโล	68.2	25.0	6.8	ดินร่วนทราย
6. สถานีวิจัยประมงฯ	82.4	12.8	4.8	ดินทรายร่วน
7. บางพระ	80.2	13.0	6.8	ดินทรายร่วน
8. กัปตันยุทธ	89.2	6.0	4.8	ดินทราย
9. บางแสน	92.2	3.8	4.0	ดินทราย
10. อ่างศิลา	60.6	30.8	8.6	ดินร่วนทราย

**ตารางผนวกที่ ข3** ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดินตะกอนครั้งที่ 3 (ฤดูร้อน)

จุดเก็บตัวอย่าง	ชนิดอนุภาค			เนื้อดิน
	ทราย (ร้อยละ)	ทรายแป้ง (ร้อยละ)	ดินเหนียว (ร้อยละ)	
1. ปราสาทสังขรรม	82.6	10.0	7.4	ดินทรายร่วน
2. บ้านพักคนชรา	83.8	9.8	6.4	ดินทรายร่วน
3. หัวแหลมฉับัง	58.0	29.8	12.2	ดินร่วนทราย
4. สะพานแก๊สเอสโซ	75.8	18.0	6.2	ดินร่วนทราย
5. สะพานไซโล	85.0	8.8	6.2	ดินทรายร่วน
6. สถานีวิจัยประมงฯ	75.0	19.0	6.0	ดินร่วนทราย
7. บางพระ	95.0	1.2	3.8	ดินทราย
8. กัปตันยุทธ	92.0	4.0	4.0	ดินทราย
9. บางแสน	95.2	0.8	4.0	ดินทราย
10. อ่างศิลา	72.0	22.0	6.0	ดินร่วนทราย



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนในแต่ละฤดูกาล

**ตารางผนวกที่ 1** ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตะกอนแต่ละฤดูกาล

จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)			เฉลี่ย
	ฤดูฝน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
1. ปราสาทสังขรรม	0.43	0.29	0.41	0.38
2. บ้านพักคนชรา	0.47	0.43	0.34	0.41
3. ห้วแหลมฉบบัง	0.64	0.55	0.65	0.62
4. สะพานแก๊สเอสโซ	0.37	0.35	0.38	0.37
5. สะพานไซโล	0.29	0.34	0.25	0.29
6. สถานีวิจัยประมงฯ	0.48	0.25	0.38	0.37
7. บางพระ	0.33	0.34	0.15	0.27
8. กัปตันยุทธ	0.31	0.19	0.17	0.22
9. บางแสน	0.10	0.16	0.15	0.14
10. อ่างศิลา	0.30	0.50	0.30	0.37



ภาคผนวก ง  
ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอนและในสัตว์หน้าดิน และค่ามาตรฐาน โลหะหนักใน  
ดินตะกอนทะเลของต่างประเทศ

**ตารางผนวกที่ 1** ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในดินตะกอน

จุดเก็บตัวอย่าง (ครั้งที่)	โลหะหนักในดินตะกอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล	แคดเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	ทองแดง	ปรอท	ตะกั่ว
ปราสาทสังขรรม (1)	115±1	30±1	ND	13±1	140±2	4,347±91	15±1	84±2	261±8
ปราสาทสังขรรม (2)	642±9	45±2	116±6	25±1	371±9	7,852±82	29±1	62±2	146±0.5
ปราสาทสังขรรม (3)	934±42	36±5	89±12	15±7	246±12	8,184±158	20±1	ND	10±8
บ้านพักคนชรา (1)	92±9	42±1	14±7	13±1	192±3	3,422±98	29±2	69±2	158±9
บ้านพักคนชรา (2)	1,149±26	85±3	123±5	41±9	322±3	7,318±330	76±5	60±0.1	114±2
บ้านพักคนชรา (3)	755±94	44±4	107±71	24±9	130±15	4,750±265	146±84	ND	27±16
หัวแหลมฉบ้ง (1)	120±8	46±1	ND	23±2	195±2	6,109±36	28±1	72±4	73±2
หัวแหลมฉบ้ง (2)	918±1	94±2	ND	27±1	244±2	11,984±685	55±2	62±2	148±5
หัวแหลมฉบ้ง (3)	858±171	51±3	76±68	41±24	226±58	11,895±2122	189±132	ND	29±24
สะพานแก๊สไฮโดร (1)	77±5	32±2	ND	7±1	155±3	3,835±27	15±0.4	68±2	233±7
สะพานแก๊สไฮโดร (2)	442±9	35±2	73±1	15±1	78±2	7,219±168	11±0.2	59±2	33±0.3
สะพานแก๊สไฮโดร (3)	550±136	37±9	177±84	25±17	254±21	8,174±405	86±45	152±34	19±8

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง (ครั้งที่)	โลหะหนักในดินตะกอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล	แคดเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	ทองแดง	ปรอท	ตะกั่ว
สะพานไขโล (1)	92±4	58±1	ND	12±0.4	258±5	5,967±76	137±4	68±2	206±8
สะพานไขโล (2)	675±3	116±6	61±5	23±2	358±6	19,857±97	654±28	62±0.4	239±8
สะพานไขโล (3)	636±110	38±2	80±39	48±28	292±35	9,007±449	151±140	110±9	28±22
สถานีวิจัยประมง (1)	67±0.8	58±3	ND	11±2	147±2	4,548±66	21±1	63±2	139±3
สถานีวิจัยประมง (2)	244±6	36±2	ND	17±1	37±2	6,286±23	26±0.3	61±0.6	124±6
สถานีวิจัยประมง (3)	490±86	38±13	92±15	26±20	174±10	10,225±269	25±8	68±90	26±11
บางพระ (1)	116±13	54±1	ND	6±0.01	170±3	3,729±25	19±0.3	62±1	151±7
บางพระ (2)	728±81	35±3	ND	36±4	211±6	6,261±172	27±0.6	60±0.26	143±14
บางพระ (3)	670±126	18±5	106±82	12±4	96±10	3,363±229	278±207	ND	21±19
กัปตันยุทธ (1)	172±13	34±1	ND	11±5	165±1	2,774±10	14±0.2	62±1	185±16
กัปตันยุทธ (2)	305±44	19±2	86±8	67±6	10±3	2,643±243	20±0.6	58±2	192±16
กัปตันยุทธ (3)	1,102±421	21±5	153±40	30±24	126±93	2,939±335	293±224	ND	29±30

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง (ครั้งที่)	โลหะหนักในดินตะกอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล	แคดเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	ทองแดง	ปรอท	ตะกั่ว
บางแสน (1)	33±3	32±3	ND	13±1	84±1	2,842±43	11±0.3	60±0.5	98±11
บางแสน (2)	147±35	13±1	67±12	25±7	33±9	4,177±194	20±1	60±1	84±15
บางแสน (3)	403±23	30±11	68±42	51±38	108±52	6,454±460	115±46	ND	29±10
อ่างศิลา (1)	96±4	34±3	15±2	17±2	327±5	4,176±31	13±0.4	61±2	146±4
อ่างศิลา (2)	609±73	34±7	70±10	22±2	594±13	9,777±70	26±1	61±1	136±10
อ่างศิลา (3)	1,360±137	37±7	255±119	29±17	496±94	8,763±577	442±532	ND	ND

**ตารางผนวกที่ 2** ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในสัตว์หน้าดิน

จุดเก็บตัวอย่าง (ครั้งที่)	โลหะหนักในสัตว์หน้าดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล	แคดเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	ทองแดง	ปรอท	ตะกั่ว
ปราสาทสังขรรม (1)	5,224	365	4,860	358	ND	1,270	342	ND	ND
ปราสาทสังขรรม (2)	6,923	1,510	8,255	ND	ND	4,559	1,085	ND	9,337
ปราสาทสังขรรม (3)	ND	47	43	ND	210	343	2	ND	145
บ้านพักคนชรา (1)	50,611	15,978	75,189	15,278	ND	21,483	5,628	ND	ND
บ้านพักคนชรา (2)	311	65	13	ND	4	188	11	ND	18
บ้านพักคนชรา (3)	ND	699	16	ND	ND	227	29	ND	ND
หัวแหลมฉะบั้ง (1)	6,217	1,883	3,612	ND	990	3,570	386	ND	ND
หัวแหลมฉะบั้ง (2)	2,837	516	3,335	23	604	1,273	264	ND	141
หัวแหลมฉะบั้ง (3)	ND	1,601	ND	137	475	7,214	ND	ND	ND
สะพานแก๊สเอสโซ (1)	11,887	7,098	10,764	5,908	ND	24,303	1,643	ND	ND
สะพานแก๊สเอสโซ (2)	11,271	6,500	ND	1,247	ND	8,483	1,814	ND	ND
สะพานแก๊สเอสโซ (3)	ND	53	ND	ND	437	ND	ND	ND	166
สะพานไซโล (1)	114	49	106	ND	385	480	32	ND	ND
สะพานไซโล (2)	ND	366	1,205	2,316	ND	1,583	258	ND	ND
สะพานไซโล (3)	ND	150	118	ND	ND	432	ND	ND	ND

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง (ครั้งที่)	โลหะหนักในสัตว์หน้าดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล	แคดเมียม	แมงกานีส	เหล็ก	ทองแดง	ปรอท	ตะกั่ว
สถานีวิจัยประมง (1)	3,180	2,137	17,071	984	ND	4,809	1,233	ND	2,648
สถานีวิจัยประมง (2)	42,442	7,988	31,804	ND	ND	8,917	4,275	ND	400
สถานีวิจัยประมง (3)	ND	416	2,773	ND	ND	ND	ND	ND	ND
บางพระ (1)	1	2	ND	ND	10	15	ND	ND	ND
บางพระ (2)	414	97	116	ND	154	421	56	ND	ND
บางพระ (3)	ND	13	10	ND	114	168	4	ND	ND
กัปตันยุทธ (1)	40	7	27	ND	6	150	4	ND	ND
กัปตันยุทธ (2)	44	17	17	93	8	179	3	ND	ND
กัปตันยุทธ (3)	ND	1	ND	ND	2	14	ND	ND	ND
บางแสน (1)	428	226	326	111	228	2,872	43	ND	127
บางแสน (2)	1,291	496	ND	642	ND	ND	ND	ND	ND
บางแสน (3)	ND	51	869	102	122	352	ND	ND	899
อ่างศิลา (1)	ND	14,846	17,283	149	ND	7,788	2,593	ND	4,273
อ่างศิลา (2)	96	618	ND	27	ND	3,967	ND	ND	6,720
อ่างศิลา (3)	ND	1,435	ND	806	ND	ND	ND	ND	15,281

**ตารางผนวกที่ 3** ค่าเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักในดินประเทศไทยและสหภาพยุโรป

เกณฑ์กำหนด	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	สารหนู	แคดเมียม	ตะกั่ว	สังกะสี	ทองแดง	แมงกานีส	โครเมียม	นิกเกิล	โคบอลต์
- ค่าเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร, 2545)	30	0.15	55	70	45	-	80	45	20
- ปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในดินเพื่ออยู่อาศัยและการเกษตร ตามร่างประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2546)	3.9	37	400	-	-	1,800	-	1,600	300
- ปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในดินที่ไม่ได้ใช้เพื่ออยู่อาศัยและการเกษตร ตามร่างประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2546)	27	810	750	-	-	32,000	-	41,000	640
- ค่ากำหนดที่ยอมให้มีได้ในกากตะกอนที่จะนำไปใช้ในการเกษตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)	-	20	1,000	3,000	900	-	1,000	400	-
- ค่าเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินของสหภาพยุโรป (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)	-	3	100	300	100	-	100	50	100

ที่มา: สทธ. (2555)

**ตารางผนวกที่ 4** เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินตะกอนสำหรับแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเล

เกณฑ์กำหนด	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	ตะกั่ว	สารหนู	แคดเมียม	สังกะสี	โครเมียม	ทองแดง
- ค่าความเข้มข้นที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลตามข้อกำหนดใน Florida DER Sediment Quality Guideline-Threshold effect level	0.03	0.0072	0.0007	0.124	0.0523	0.0187
- ค่าความเข้มข้นที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลตามร่างข้อกำหนดใน Australia and New Zealand Draft Sediment Quality Guideline-lower	0.05	0.02	0.0015	0.20	0.08	0.065
- ค่าความเข้มข้นที่อาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล ตามข้อกำหนดใน Florida DEP Sediment Quality Guideline -Threshold effect level	0.112	0.0416	0.0042	0.271	0.16	0.108
- ค่าความเข้มข้นที่อาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล ตามร่างข้อกำหนดใน Australia and New Zealand Draft Sediment Quality Guideline-lower	0.22	0.07	0.0096	0.41	0.37	0.27
- ค่าความเข้มข้นที่สามารถขุดลอกตะกอนดินได้ ตามร่างข้อกำหนด Hong Kong Draft Sediment Quality Guideline-higher	0.075	0.008	0.0015	0.20	0.08	0.065
- ค่าความเข้มข้นที่สามารถขุดลอกตะกอนดินได้โดยต้องผ่านการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามร่างข้อกำหนด Hong Kong Draft Sediment Quality Guideline-higher	0.11	0.0042	0.004	0.27	0.16	0.11

ที่มา: สทช. (2555)



ภาคผนวก จ  
วิธีการวิเคราะห์ชนิดสัตว์หน้าดินในดินตะกอน

### การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างสัตว์หน้าดิน

เก็บตัวอย่างสัตว์หน้าดินโดยใช้เครื่องมือตักดินแบบ Ekman dredge grab จากนั้นนำดินตะกอนที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด 2.00, 0.85 และ 0.425 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อแยกสัตว์หน้าดินออกมาและดองด้วยน้ำยาฟอร์มาลิน 10% ที่ผสมด้วย rose bengal แล้วนำตัวอย่างมาจำแนกชนิดของสัตว์หน้าดินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป (Stereo microscope) ทำการนับจำนวนของสัตว์หน้าดินในหน่วยจำนวนตัวต่อตารางเมตร

### การคำนวณค่าดัชนีความหลากหลาย (diversity index)

คำนวณตามสูตรของ Shannon - Weiner diversity index (Smith, 2002) ดังนี้

$$H = - \sum (p_i \log_2 p_i) \quad (32)$$

เมื่อ  $H$  = ดัชนีความหลากหลาย

$p_i$  = สัดส่วนของจำนวนวงศ์สัตว์หน้าดินชนิดที่  $i$  ต่อจำนวนวงศ์สัตว์หน้าดินทั้งหมดในตัวอย่าง

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวลธิชา เผ่าผาง
เกิดวันที่	10 พฤษภาคม 2529
สถานที่เกิด	อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการผลิตบัณฑิตวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระดับปริญญาโท (ผนวท.)