

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการศึกษา

5.1 การคำนวณอัตราการตกตะกอน และอายุตะกอน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสี Pb-210 ในตัวอย่างตะกอนแบบแห้งของสถานี อำวระยอง และ สถานีอำเภอกาหลง (ตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9) และการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพรังสีตามลำดับความลึก (รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการตกตะกอน และหาอายุตะกอน ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 สถานีอำวระยอง

เมื่อพิจารณารูปกราฟระหว่างอัตราการสลายตัว (activity) ของ Pb-210 ในตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ สถานีอำวระยอง (รูปที่ 4.5) พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในลักษณะเดียวกับการศึกษาของ Nittrouer *et al.*, (1979) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 (รูปที่ 2.1) กล่าวคือ เราสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงออกได้เป็น 3 ส่วน ตามลำดับความลึก ประกอบด้วย

- Surface Mixed Layer (SML) ได้แก่ ตะกอนส่วนบนซึ่งตามธรรมชาติแล้วจะถูกรบกวนด้วยกระบวนการทางกายภาพและ bioturbation ต่างๆ ค่ากัมมันตภาพรังสีในตะกอนส่วนนี้มีลักษณะสูง-ต่ำ ไม่สามารถสรุปถึงการเปลี่ยนแปลงได้ ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นกับตะกอนช่วง 0.0-2.0 ซม. จากผิวบน

- ตะกอนส่วนที่ติดต่อกับ SML ลงมา มีชื่อว่า Region of Radioactive Decay ซึ่งรูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพรังสีในตะกอนมีแนวโน้มลดลงแบบ Exponential ตามลำดับความลึก เมื่อพิจารณาในเชิงของ \ln ของค่ากัมมันตภาพรังสีแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้มีแนวโน้มลดลงเป็นเส้นตรง ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นกับตะกอนช่วงความลึกตั้งแต่ 2.0 ซม. ลงมา จนถึง 30.0 ซม. (รูปที่ 5.1) แม้ว่าการลดลงของค่ากัมมันตภาพรังสีจะมีลักษณะไม่เป็นระเบียบนัก ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากอนุภาคขนาดเล็กในช่วง clay size material ในแต่ละชั้นตะกอนไม่เท่ากัน

- สำหรับค่าพื้นฐาน (Background level) หรือ Supported Pb-210 ได้แก่ ค่ากัมมันตรังสีใน ตะกอนชั้นล่างลึกต่อจาก Region of Radioactive Decay ลงมา อัตราการสลายตัวของ Pb-210 มีค่าต่ำ แสดงถึงถึงตะกอนอายุมาก ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นกับตะกอนของสถานีอ่าวระยองตั้งแต่ช่วง 30.0 ซม. ลงมาจนถึงชั้นล่างสุด จึงได้กำหนด Supported Pb-210 ของตะกอนสถานีอ่าวระยองเท่ากับ 1.00 dpm/g (ตารางที่ 4.8)

จากสมการอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ค่า \ln (excess Pb-210) ในตะกอนที่ ระดับความลึกต่างๆ สามารถแทนค่าได้ด้วยสูตร

$$A_0 = A_x \exp(-bx)$$

เมื่อ A_0 = ค่า \ln (excess Pb-210) ที่ total accumulation X นับจากจุดเริ่มต้นของ Region of Radioactive decay ลงมา

A_x = ค่า \ln (excess Pb-210) ที่จุดเริ่มต้นของ Region of Radioactive decay

b = slope ของ least square fitted line เมื่อ plot ระหว่าง \ln (excess Pb-210) กับ total mass accumulation (mass/area)

X = total mass accumulation (mg/cm^2) ซึ่งคำนวณได้จากค่าน้ำหนักเปียก และน้ำหนักแห้ง ของตะกอนในชั้นต่าง ๆ

ภายใต้ Region of Radioactive Decay

$$b = \lambda / s$$

λ = ค่า decay constant ของ Pb-210 กัมมันตรังสี มีค่า 0.03114 ต่อปี

S = อัตราการทับถมของตะกอนในหน่วย mass/area/time

จากค่าอัตราการตกตะกอน (S) สามารถนำมาคำนวณเป็นอายุของตะกอนในแต่ละชั้นได้ จากสูตร

$$\text{อายุตะกอน} = \frac{X (\text{mg}/\text{cm}^2)}{S (\text{mg}/\text{cm}^2 \text{ /year})}$$

พิจารณาจากสมการอัตราการสลายตัวของ Pb-210 ในตะกอนที่ total accumulation rate ใดๆ เมื่อ A_0 , A_x , X , และ λ มีค่าคงที่ ค่าอัตราการตกตะกอน (S) จึงขึ้นอยู่กับความชัน (slope) ของ กราฟระหว่าง \ln (excess Pb-210) และความหนาแน่นของตะกอน (mass/area) ภายใต้ Region of Radioactive decay นั่นเอง ดังนั้น การกำหนดช่วงของ SML จึงมีความสำคัญต่อการคำนวณอัตราการตกตะกอน เนื่องจากเมื่อจุดเริ่มต้นของ Region of Radioactive Decay เปลี่ยนไป จะเป็นสาเหตุให้ค่า slope (b) เปลี่ยนตามไปด้วย

จากรูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่า \ln (excess Pb-210) ตามลำดับความลึกของตะกอนสถานี อำวระยอง (รูปที่ 5.1) ได้กำหนด Region of Radioactive Decay ที่ช่วงความลึก 2.0-30.0 ซม. และหาค่า slope ของ least square fitted line ที่ช่วงความลึกดังกล่าวได้มีค่าเท่ากับ 0.23 นำค่า slope (b) มาคำนวณหาอัตราการตกตะกอน (S) มีค่าเท่ากับ 135.40 มก./ตร.ซม./ปี หรือ 2.66 ม.ม. ต่อปี นำค่าอัตราการตกตะกอน (S) มาคำนวณหาอายุตะกอนภายในช่วงของ Region of Radioactive Decay (2.0-30.0 ซม.) ปรากฏว่าตะกอนแต่ละชั้นมีอายุมากขึ้นตามระดับความลึก เริ่มตั้งแต่ 10.2 ปี จนถึง 123.2 ปี (ตารางที่ 5.1)

สำหรับตะกอนตั้งแต่ผิวบนลงมาถึงจุดเริ่มต้นของ Region of Radioactive Decay ไม่สามารถหาอายุได้ เนื่องจากค่ากัมมันตรังสีไม่แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ขณะที่ตะกอนชั้นล่างในระดับที่ลึกต่ำกว่า Region of Radioactive Decay ลงมา ไม่สามารถที่จะหาอายุได้เช่นกัน เนื่องจาก excess Pb-210 มีระดับต่ำจนไม่สามารถวัดค่าได้แน่นอน

5.1.2 สถานีอำเภอกกลง

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่ากัมมันตภาพรังสี Pb-210 ตามลำดับความลึกในตะกอนของสถานีอำเภอกกลง (รูปที่ 4.6) มีลักษณะคล้ายกับที่รายงานโดย Nittrouer *et al.*, (1979) เช่นเดียวกัน ดังอธิบายได้ต่อไปนี้

- เริ่มจาก Surface Mixed Layer (SML) ได้แก่ ตะกอนชั้นบนสุดลงมาถึงระดับความลึก 6.0 ซม. อัตราการสลายตัวของ Pb-210 ตามความลึกของตะกอนช่วงนี้มีลักษณะ สูง-ต่ำ ไม่สามารถสรุปได้แน่นอน

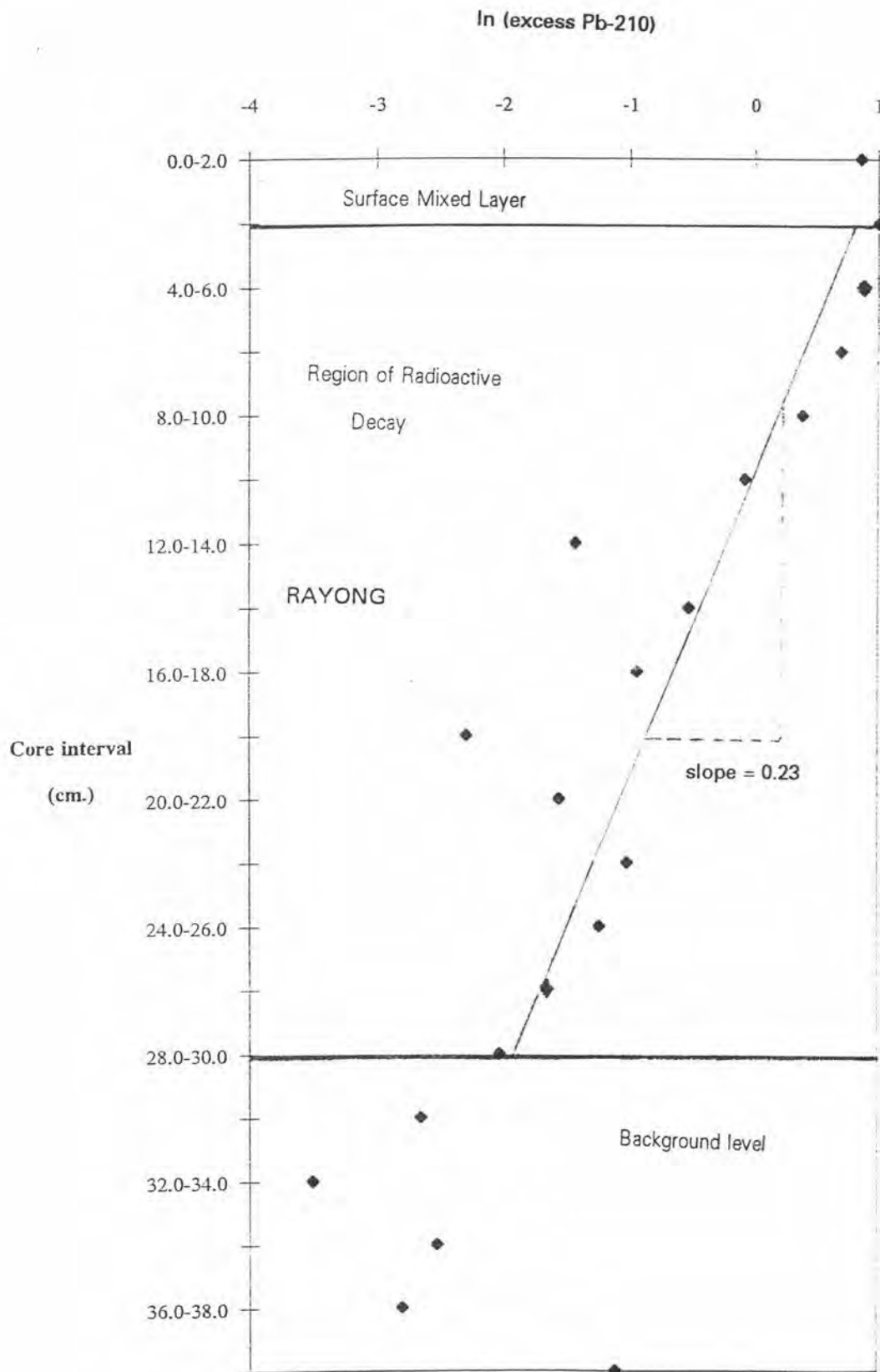
- Region of Radioactive Decay ได้แก่ ตะกอนที่ความลึกต่อจาก 6.0 ซม. ลงมา จนถึง 16.0 ซม. อัตราการสลายตัวของกัมมันตรังสีในตะกอนส่วนนี้มีแนวโน้มลดลงแบบ Exponential ตามลำดับความลึก ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นที่ช่วงความลึก 6.0 - 16.0 ซม.

- ที่ความลึกต่อจาก 16.0 ซม. ลงมา อัตราการสลายตัวมีค่าต่ำและมีแนวโน้มคงที่ แสดงถึงการสะสมของตะกอนอายุมากที่ทับถมกันแน่น มีความหนาเกือบครึ่งหนึ่งของแท่งตะกอนช่วงล่าง จึงได้กำหนดค่ากัมมันตภาพรังสีในช่วงนี้เป็น Background level หรือ Supported Pb-210 (ตารางที่ 4.9)

เมื่อพิจารณาในเชิงของ \ln แล้วพบว่า Region of Radioactive Decay มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยค่า \ln (excess Pb-210) มีลักษณะลดลงเป็นกราฟเส้นตรงตามความลึกในช่วง 7.0-15.0 ซม. (รูปที่ 5.2) เมื่อหาค่า slope ของ least square fitted line ที่ช่วงความลึกดังกล่าวปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.66 นำ slope (b) มาหาค่าอัตราการตกตะกอน (sedimentation rate) ได้เท่ากับ 47.18 มก./ตร.ซม./ปี หรือ 1.16 ม.ม. ต่อปี

ค่าอัตราการตกตะกอน (S) ของสถานีอำเภอแก่ง นำมาคำนวณหาอายุตะกอนที่ระดับชั้นต่างๆ ภายใน Region of Radioactive Decay (6.0-16.0 ซม.) ปรากฏผลว่า เป็นตะกอนอายุมากเริ่มตั้งแต่ อายุ 54.6 ปี จนถึง 123.8 ปี (ตารางที่ 5.2)

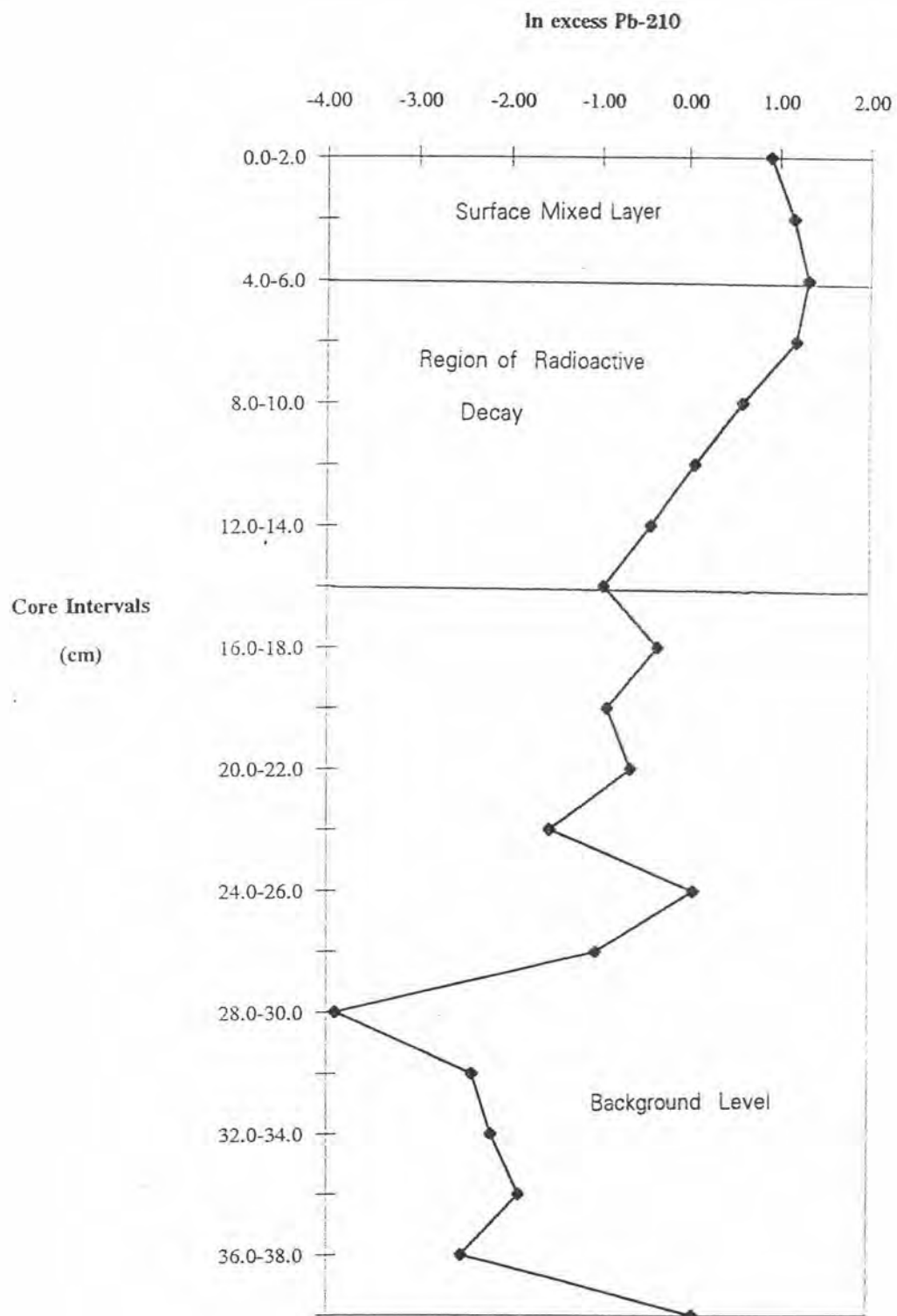
อัตราการตกตะกอนของสถานีอ่าวระยอง (2.66 ม.ม.ต่อปี) และสถานีอำเภอแก่ง (1.16 ม.ม.ต่อปี) มีค่าต่ำกว่าอัตราการตกตะกอนของอ่าวไทยตอนบนซึ่งอยู่ในช่วง 4-11 ม.ม. ต่อปี (Windom *et al.*, 1984) น่าจะเนื่องมาจากลักษณะทางสมุทรศาสตร์ที่อ่าวไทยตอนบนเป็นแหล่งรองรับตะกอนปริมาณมากจากแม่น้ำสายใหญ่ถึง 4 สาย จึงมีค่าอัตราการตกตะกอนสูงกว่าสถานีทั้งสองในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 5.1 ค่า In (excess Pb-210) ตามความลึกในตะกอนสถานีอ่าวระยอง

ตารางที่ 5.1 แสดงอายุตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ ของสถานีอ่าวระยอง

Core intervals (cm)	Mid-point Depth	Mass (g/cm ²)	Pb-210 In-excess	Age (year)
0-2	1	0.454	0.86	SML
2-4	3	1.385	1.00	10.2
4-6	5	2.400	0.88	17.7
6-8	7	3.469	0.70	25.6
8-10	9	4.564	0.39	33.7
10-12	11	5.722	-0.88	42.3
12-14	13	6.948	-1.43	51.3
14-16	15	8.173	-0.53	60.4
16-18	17	9.347	-0.94	69.0
18-20	19	10.564	-2.30	78.0
20-22	21	11.787	-1.56	87.1
22-24	23	12.969	-1.02	95.8
24-26	25	14.179	-1.24	104.7
26-28	27	15.440	-1.66	114.0
28-30	29	16.684	-2.04	123.2
30-32	31	17.931	-2.66	ตะกอนอายุมาก
32-34	33	19.213	-3.51	ตะกอนอายุมาก
34-36	35	21.396	-2.53	ตะกอนอายุมาก
36-38	37	24.023	-2.81	ตะกอนอายุมาก
38-42	40	27.252	-1.11	ตะกอนอายุมาก



รูปที่ 5.2 ค่า In (excess Pb-210) ตามความลึกในตะกอนสถานีอำเภอกาหลง

ตารางที่ 5.2 แสดงอายุตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ ของสถานีอำเภอแก่ง

Core intervals (cm)	Mid-point Depth	Mass (g/cm ²)	Pb-210 In-excess	Age (year)
0-2	1	0.297	0.90	SML
2-4	3	0.983	1.15	SML
4-6	5	1.774	1.31	SML
6-8	7	2.578	1.18	54.6
8-10	9	3.374	0.60	71.5
10-12	11	4.167	0.07	88.3
12-14	13	4.990	-0.43	105.8
14-16	15	5.842	-0.97	123.8
16-18	17	6.696	-0.34	ตะกอนอายุมาก
18-20	19	7.557	-0.92	ตะกอนอายุมาก
20-22	21	8.424	-0.65	ตะกอนอายุมาก
22-24	23	9.292	-1.56	ตะกอนอายุมาก
24-26	25	10.180	0.08	ตะกอนอายุมาก
26-28	27	11.048	-1.05	ตะกอนอายุมาก
28-30	29	11.884	-3.91	ตะกอนอายุมาก
30-32	31	12.720	-2.41	ตะกอนอายุมาก
32-34	33	13.562	-2.21	ตะกอนอายุมาก
34-36	35	14.392	-1.90	ตะกอนอายุมาก
36-38	37	15.221	-2.53	ตะกอนอายุมาก
38-40	39	16.071	0.08	ตะกอนอายุมาก

5.2 ปริมาณคาร์บอนเนต

ปริมาณคาร์บอนเนตในตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ ของสถานีอ่าวระยอง และสถานีอำเภอกแกลง มีค่าเฉลี่ยเป็น 14.55 เปอร์เซ็นต์ และ 16.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2) จัดได้ว่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยคาร์บอนเนตในตะกอนของอ่าวไทยตอนในจำนวน 73 สถานี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.8 เปอร์เซ็นต์ (ศิริชัย ธรรมวานิช, 1984) ซึ่งน่าจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากตะกอนทั้งสองสถานีนี้นิยมเปลือกหอยปะปนอยู่มากในทุกชั้น

อย่างไรก็ตาม คาร์บอนเนตที่มีค่าสูงและไม่เท่ากันได้แสดงให้เห็นว่าตะกอนทั้งสองสถานีอยู่ภายใต้อิทธิพลการทับถมคนละแบบ เพื่อชดเชยความแปรปรวนของคาร์บอนเนต จึงทำการปรับค่าความเข้มข้นของผลการวิเคราะห์โลหะในตะกอน(เนน.โลหะ/ตะกอน 1 กรัม) ให้อยู่ในรูปของ carbonate-free ซึ่งจะทำให้ค่าโลหะในตะกอนสามารถเปรียบเทียบกันได้บนฐานที่ถูกต้องเหมาะสมขึ้น ตามสูตรการคำนวณ ดังนี้ (ปรับปรุงจาก Forstner and Wittmann, 1981)

$$\text{ความเข้มข้นของโลหะในตะกอน (carbonate-free basis)} = \frac{\text{ค่าความเข้มข้นจากการวิเคราะห์}}{100 - \% \text{ คาร์บอนเนต}}$$

ค่าโลหะในตะกอน (carbonate-free basis) ที่ระดับความลึกต่างๆ ของสถานีอ่าวระยอง และ สถานีอำเภอกแกลง แสดงในตารางที่ 5.3 และค่าโลหะในตะกอนผิวหน้าอ่าวระยอง (carbonate-free basis) แสดงในตารางที่ 5.4

5.3 ปริมาณสารอินทรีย์

นอกจากจะเป็นที่ทราบกันดีว่าสารอินทรีย์และปริมาณโลหะในตะกอนทะเลมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดแล้ว (Dossis and Warren, 1980; Kitano *et al.*, 1980; Katz and Kaplan, 1981; Finney and Huh, 1989 อ้างถึงใน Krumgalz and Fainshtein, 1991) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามความลึกของตะกอนในสภาพขาดออกซิเจน และการย่อยสลายอินทรีย์สารของแบคทีเรียภายใต้สภาวะหลังการตกตะกอน (post-depositional) ยังมีความสำคัญต่อพฤติกรรมทางเคมีของโลหะแต่ละชนิดในการตกตะกอน และการละลายกลับ (remobilize) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของโลหะที่สะสมอยู่ตามความลึกในตะกอนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้ยากที่จะจำแนกว่าโลหะส่วนใดมาจากกระบวนการตามธรรมชาติ ส่วนใดมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ดังอธิบายได้ต่อไปนี้

- บริเวณออกซิไดซ์ (oxic zone) ได้แก่ ตะกอนชั้นบนตั้งแต่ผิวน้ำลงมา ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจะมีสีเขียว หรือสีเขียวออกน้ำตาล คล้ายกับตะกอนชั้นบนบริเวณ Surface Mixed Layer ของสถานีอ่าวระยองช่วง 0.0-4.0 ซม. และสถานีอำเภอกแกลงช่วง 0.0-8.0 ซม. ตะกอนบริเวณนี้ได้รับ

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าโลหะในตะกอน (carbonate-free basis) ที่ระดับความลึกต่างๆ ของสถานี
อ่าวระยอง และสถานีอำเภอกแกลง

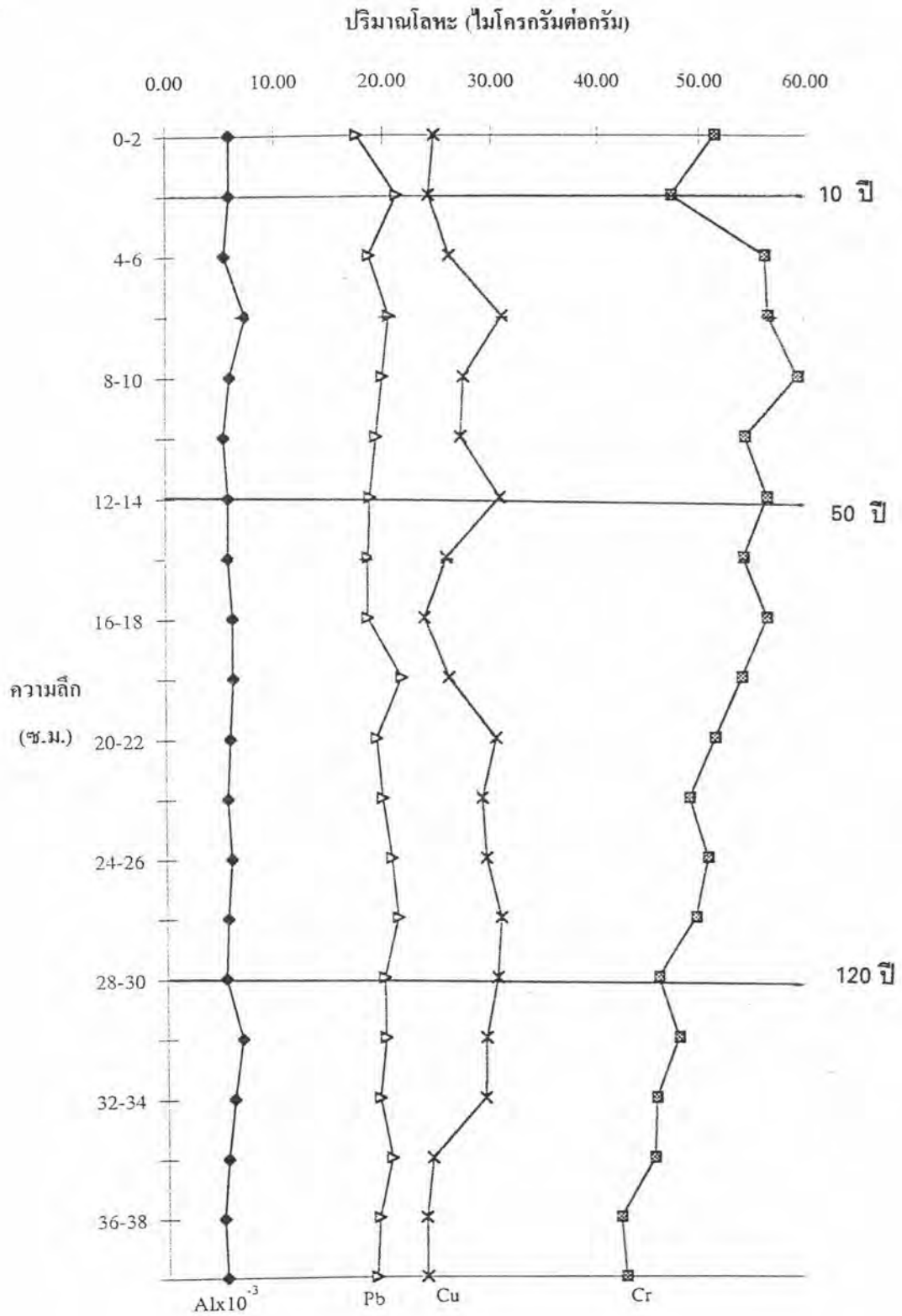
Core Intervals (cm)	Al (%)		Cr (µg/g)		Cu (µg/g)		Pb (µg/g)	
	ระยอง	กแกลง	ระยอง	กแกลง	ระยอง	กแกลง	ระยอง	กแกลง
0-2	5.80	4.81	51.4	65.7	17.6	25.8	24.6	22.4
2-4	5.77	4.95	47.3	58.3	21.2	23.9	29.7	21.7
4-6	5.29	4.74	56.1	59.7	18.7	23.2	26.0	23.1
6-8	5.35	4.58	56.4	61.3	20.5	24.1	29.7	23.5
8-10	5.83	4.79	59.3	59.1	19.9	26.2	27.4	23.2
10-12	5.27	4.76	54.4	64.4	19.4	23.3	28.2	22.7
12-14	5.68	4.83	56.4	64.7	18.8	25.7	23.7	23.1
14-16	5.68	4.64	54.3	66.8	18.7	23.2	25.8	22.7
16-18	5.27	4.79	56.5	57.2	18.6	24.4	27.1	22.5
18-20	6.14	5.60	54.2	64.9	21.7	25.0	26.1	23.4
20-22	5.83	5.26	51.6	66.7	19.4	26.6	29.2	25.1
22-24	5.56	5.01	49.2	64.6	19.9	25.8	27.1	24.4
24-26	5.93	5.25	51.0	66.9	20.7	26.4	23.1	25.8
26-28	5.58	5.81	49.8	69.0	21.3	26.8	23.7	24.4
28-30	5.36	5.51	46.2	68.1	20.0	23.6	25.2	23.3
30-32	6.16	4.96	48.2	66.8	20.1	26.0	26.6	23.3
32-34	6.08	5.66	45.9	69.7	19.5	27.1	29.4	25.6
34-36	5.47	5.19	45.8	66.4	20.6	26.1	24.4	23.9
36-38	5.04	5.17	42.5	59.6	19.4	27.3	23.7	24.2
38-42	5.32	5.64	43.0	67.1	19.2	26.5	23.8	24.2

หมายเหตุ แท่งตัวอย่างตะกอนสถานีอำเภอกแกลง มีความลึก 40 ซม.

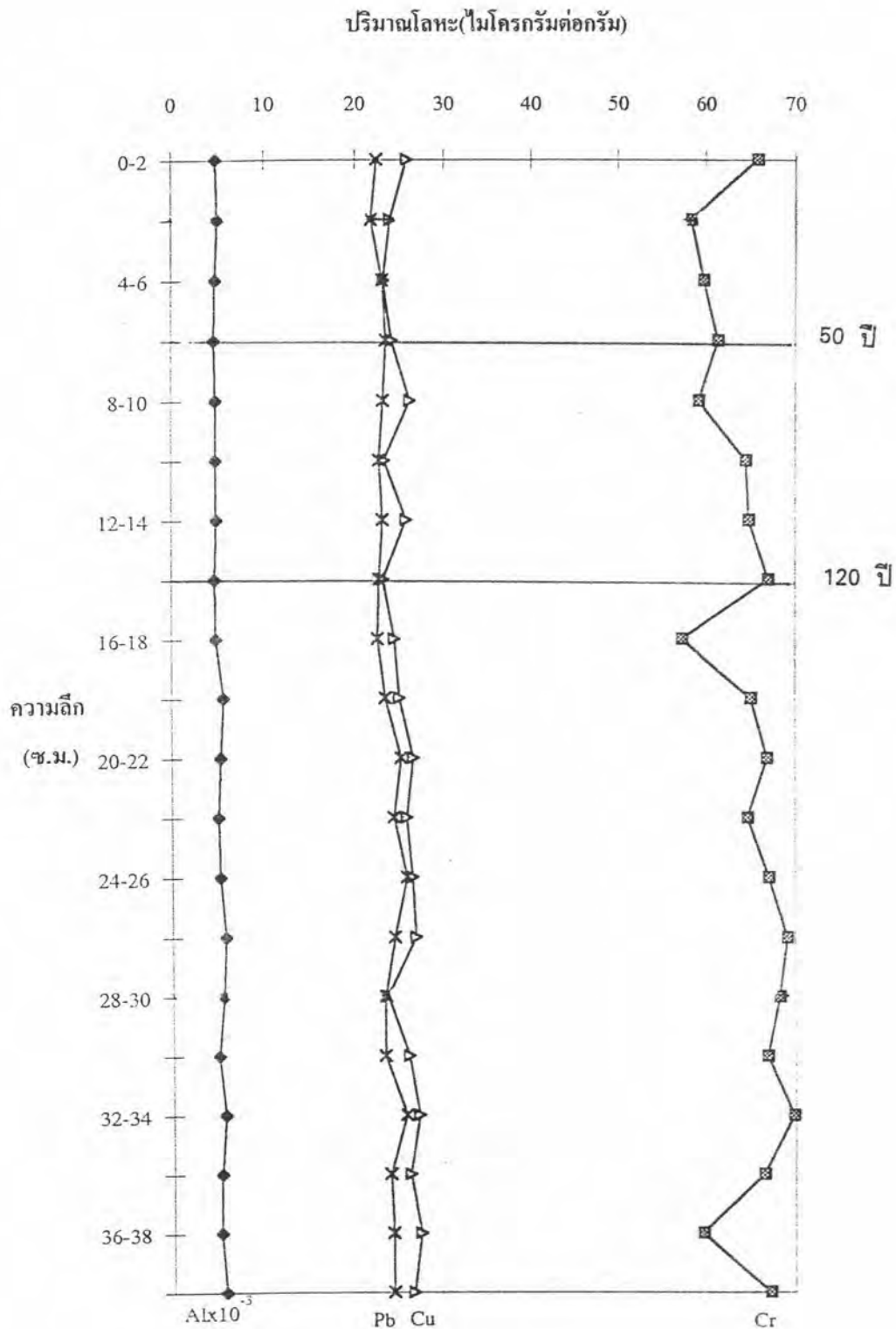
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าโลหะในตะกอน (carbonate-free basis) ของตัวอย่าง
ตะกอนผิวหน้า ($\leq 63 \mu\text{m}$) อ่าวระยอง

ระยะทาง ห่างฝั่ง	สถานี	ค่าโลหะในตะกอน (carbonate-free basis)			
		Al (%)	Cr ($\mu\text{g/g}$)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Pb($\mu\text{g/g}$)
6 ก.ม.	B1	6.72	46.73	18.64	23.97
	B2	5.86	54.87	20.32	28.95
	B3	6.09	56.52	18.60	24.03
	mean	6.22	52.71	19.19	25.65
	S.D.	0.45	5.24	0.98	2.86
9 ก.ม.	C1	6.38	53.93	18.23	27.09
	C2	6.18	49.75	19.83	30.05
	C3	5.47	50.76	18.81	26.89
	mean	6.01	51.48	18.96	28.01
	S.D.	0.48	2.18	0.81	1.77

หมายเหตุ สถานี A1 ถึง A3 มีระยะทางห่างจากชายฝั่ง 3 กิโลเมตร
ลักษณะตัวอย่างตะกอนเป็นทราย ร่อนไม่ได้



รูปที่ 5.3 แสดงปริมาณโลหะในตะกอน (carbonate - free basis) ตามลำดับความลึกของสถานีสำรวจของ



รูปที่ 5.4 แสดงปริมาณโลหะในตะกอน (carbonate - free basis) ตามลำดับความลึกของสถานีอำเภอแกลง

การรบกวนจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต เช่น มีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ทำให้ออกซิเจนถ่ายเทอยู่ตลอดเวลา สภาวะเช่นนี้ทำให้โลหะบางชนิดเช่นโครเมียม (Cr^{+6}) มีการละลายและเกิด downward migration เมื่อพบสภาวะการขาดออกซิเจน(รีดิวซ์) ในตะกอนชั้นล่าง ทำให้มีการตกตะกอนกลับในรูป $Cr(OH)_2$ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้โครเมียมที่สะสมอยู่ในตะกอนชั้นบนมีปริมาณน้อยกว่าในตะกอนชั้นล่าง (Gillard *et al.*, 1986, Shaw *et al.*, 1990 อ้างถึงใน Zwolsman, Berger, and Eck, 1993)

- บริเวณกึ่งออกซิไดซ์ (partly reduced) ได้แก่ ตะกอนที่ระดับความลึกต่อมาซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มขาดออกซิเจน ตะกอนมีสีเทาจนถึงสีเทาเข้ม แสดงถึงการสะสมของ Fe/Mn Oxyhydroxide ลักษณะเช่นนี้คล้ายกับตะกอนช่วงความลึก 4.0-18.0 ซม. ของสถานีอ่าวระยอง และช่วงความลึก 8.0- 28.0 ซม. ของสถานีอ่าวแก่ง ตะกอนบริเวณนี้มีความสำคัญต่อการสะสมโลหะในรูปการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) เนื่องจาก Fe และ Mn ในตะกอนเบื้องล่างจะมีการละลายเมื่ออยู่ในสภาพรีดิวซ์ และเกิด upward migration ร่วมกับโลหะชนิดอื่น เมื่อพบสภาวะที่มีออกซิเจนในตะกอนชั้นบน Fe และ Mn จะเริ่มเปลี่ยนสภาพกลับเป็นของแข็งอีกครั้งในรูป Fe/Mn Oxyhydroxide ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีความสามารถสูงในการ adsorb โลหะชนิดอื่น ดังนั้น ตะกอนบริเวณนี้จึงอาจมีความเข้มข้นของโลหะสูง แม้ว่าจะไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ (Tessier *et al.*, 1985; Cornwell, 1986; Finney and Huh, 1989 อ้างถึงใน Zwolsman, Berger, and Eck, 1993)

- บริเวณรีดิวซ์ (anoxic zone) ได้แก่ สภาพการขาดออกซิเจนอย่างสิ้นเชิง เกิดขึ้นในตะกอนชั้นล่างลึกต่อกับบริเวณกึ่งออกซิไดซ์ ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจะมีสีเทาปนดำ จนถึงสีดำ ซึ่งเป็นสภาพคล้ายกับตะกอนชั้นล่างของสถานีอ่าวระยองช่วงความลึก 18.0-42.0 ซม. และสถานีอ่าวแก่งช่วงความลึก 28.0-40.0 ซม.

การเปลี่ยนแปลงซัลเฟต (sulfate) เป็นซัลไฟด์ (sulfide) โดยกิจกรรมของแบคทีเรียภายใต้สภาวะการขาดออกซิเจน มีความสำคัญต่อการตกตะกอนกลับ (reprecipitate) ของตะกั่วและทองแดงในรูปของซัลไฟด์และคาร์บอนेट ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้โลหะในกลุ่มนี้สะสมอยู่ในตะกอนชั้นล่างมากกว่าชั้นบน (Gaillard *et al.*, 1986; Giblin *et al.*, 1986; Moore *et al.*, 1988, Shaw *et al.*, 1990 อ้างถึงใน Zwolsman, Berger, and Eck, 1993)

5.4 ลักษณะด้านขนาดอนุภาค

ผลการศึกษาลักษณะขนาดอนุภาค(texture)ของตัวอย่างตะกอนที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2.0 มม. พบว่า ตะกอนสถานีอ่าวระยองมีอนุภาคขนาดใหญ่ในช่วง sand-size และ silt-size (ตารางที่ 4.1) ขณะที่สถานีอ่าวแก่งมีอนุภาคตะกอนขนาดเล็กในช่วง silt-size และ clay-size รวมทั้งสารอินทรีย์ในปริมาณที่มากกว่าสถานีอ่าวระยองอย่างชัดเจน (ตารางที่ 4.2) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก

ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยในช่วงฤดูมรสุมนั้นมีตะกอนเข้ามาในปริมาณสูง ตะกอนที่พบส่วนใหญ่เป็นตะกอนทราย เช่น บริเวณจังหวัดระยอง ปากแม่น้ำประแสร์ และแม่น้ำพังราด เป็นต้น สำหรับตะกอนโคลนซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์สูงส่วนใหญ่จะพบในบริเวณจังหวัดจันทบุรี คลองเวฬุ และจังหวัดตราด (กรมทรัพยากรธรณี, 2532)

แม้ว่าจะได้ทำการลดผลกระทบจากองค์ประกอบเชิงขนาด (grain-size effect) โดยร่อนตัวอย่างตะกอนที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะให้อยู่ในช่วงของ silt/clay fraction (น้อยกว่า 63 ไมครอน) แล้วก็ตาม แต่สถานีอำเภอแก่งก็ยังมีอนุภาคขนาดเล็กในช่วงของ clay-size และค่าสารอินทรีย์ที่สูงกว่า ปริมาณโลหะในตะกอนของสถานีอำเภอแก่งจึงน่าจะมีค่ามากกว่าสถานีอ่าวระยอง เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่มักจะมีความสัมพันธ์กับตะกอนขนาดเล็ก (Din, 1992) แต่ผลที่ตรวจพบปรากฏว่า โลหะบางชนิดในตะกอนของสองสถานีไม่เป็นไปตามแนวโน้มเช่นนี้ โดยสถานีอำเภอแก่งมีค่าโครเมียมและทองแดงมากกว่าสถานีอ่าวระยอง ขณะที่สถานีอ่าวระยองมีค่าอะลูมิเนียมและตะกั่วมากกว่าสถานีอำเภอแก่ง (ตารางที่ 5.3) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.5 อัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียม

เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีรายงานการศึกษาถึงชนิดของธาตุอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับการแปลผลปริมาณโลหะหนักในตะกอน การศึกษาครั้งนี้จึงได้ตั้งข้อสมมติว่าอะลูมิเนียมเป็นธาตุอ้างอิงที่ดีที่สุดเพราะอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีปริมาณโดยเฉลี่ยมากเป็นอันดับสองในเปลือกโลก (Windom *et al.*, 1989)

ผลการวิเคราะห์ค่าอะลูมิเนียมในตะกอน (carbonate-free basis) สถานีอ่าวระยอง (5.04-6.16%) และสถานีอำเภอแก่ง (4.58-5.81%) อยู่ในช่วงที่ตรวจพบในอ่าวไทยตอนในจำนวน 73 สถานี ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.0-8.8% (carbonate-free basis) (ศิริชัย ธรรมวานิช, 1984) และอ่าวไทยตอนบนซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.7-9.0% (เฉลี่ย 5.1%) (Windom *et al.*, 1984) โดยสถานีอ่าวระยองมีค่าอะลูมิเนียมในตะกอนมากกว่าสถานีอำเภอแก่ง (ตารางที่ 5.3) เมื่อพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบเชิงขนาดแล้ว ไม่สอดคล้องกับการศึกษาทั่วไปที่พบว่าอนุภาคตะกอนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับปริมาณอะลูมิเนียม (Al-rich) (Forstner and Wittmann, 1981)

อย่างไรก็ตาม Crecelius, Bother and Carpenter (1975) ซึ่งพบว่าปริมาณอะลูมิเนียมในตะกอนของ Puget Sound (ภาคตะวันตกเฉียงเหนือของรัฐวอชิงตัน) มีความสัมพันธ์กับขนาดตะกอนที่เพิ่มขึ้น ได้อ้างถึงรายงานของ White (1967) ซึ่งทำการศึกษาตะกอนของ Washington shelf ใกล้แม่น้ำ Columbia สหรัฐอเมริกา และสรุปว่าอนุภาคตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยแร่เฟลสปาร์ (feldspars) จะมีปริมาณอะลูมิเนียมสูงกว่าอนุภาคตะกอนขนาดเล็ก ลักษณะเช่นนี้ คล้ายกับตะกอนของชายหาดมาบตาพุด

ซึ่งมีที่มาจากกรกัฒเตชะของคลื่นจากตะกอนน้ำพารูปพัดเดิม (old fan) ทำให้ตะกอนตามชายหาดส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ในขนาดของกรวดละเอียด (fine quartz gravel) และแม่น้ำระยองยังเป็นอีกทางหนึ่งที่พัดพาเอาตะกอนน้ำพารูปพัดปัจจุบัน(modern fan) มาสู่ชายหาด ตะกอนส่วนใหญ่ประกอบด้วยควอตซ์ เฟลสปาร์ เศษหินแตกหัก และมีเปลือกหอยทะเลแตกหักปะปนอยู่ (กรมทรัพยากรธรณี, 2532)

อัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียมของสถานีอ่าวระยอง และสถานีอำเภอแกลงในตารางที่ 5.5 แสดงค่าที่ใกล้เคียงกันตามความลึกในสถานีเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองสถานีพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มต่างกันแยกเป็นแต่ละกลุ่ม ลักษณะเช่นนี้ น่าจะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าตะกอนที่ทับถมในสถานีเดียวกันมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน และตะกอนในแต่ละสถานีมาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน

เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลโลหะบนพื้นทวีปในจังหวัดระยองและจันทบุรี ซึ่งคาดว่าจะเป็แหล่งที่มาของตะกอนทะเลในบริเวณที่ศึกษา โดยไม่พบรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักบนพื้นทวีปในพื้นที่ดังกล่าว คงมีเฉพาะรายงานค่าอะลูมิเนียมอยู่ในช่วง 10-30% (ตารางที่ 5.7) ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นที่ตรวจพบในตะกอน (5-6%) และค่าอะลูมิเนียมยังมีความแปรผันมากในแต่ละบริเวณ จึงยังไม่อาจสรุปได้ชัดเจนในขณะนี้ว่าตะกอนทั้งสองสถานีมาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกันหรือไม่

อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้เกี่ยวกับแหล่งที่มาของตะกอนที่น่าจะกล่าวถึงอีกกรณีหนึ่งก็คือ ตะกอนทะเลเมื่อทับถมลงไปแล้วอาจเคลื่อนย้ายต่อไปสะสมยังที่อื่นหรือตะกอนที่ทับถมอยู่ในบริเวณนั้น ถูกขนย้ายมาจากที่อื่น ดังเช่น มีการศึกษาพบว่าตะกอนของอ่าวไทยตอนในบางส่วนอาจจะมาจากทะเลจีนใต้ (ศิริชัย ธรรมวานิช, 1984)

5.6 Sediment Enrichment Factor

เมื่อนำอัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียมที่ลำดับความลึกต่างๆ ของตะกอนสถานีอ่าวระยอง และสถานีอำเภอแกลง(ตารางที่ 5.5) ไปประเมินระดับการปนเปื้อนด้วยค่า Sediment Enrichment Factor (SEF) โดยคำนวณเปรียบเทียบกับอัตราส่วนในธรรมชาติของเปลือกโลก คือ Mean sediment และ Average shale แล้ว ปรากฏผลดังตารางที่ 5.8 และ ตารางที่ 5.9 ตามลำดับ

ค่า Sediment Enrichment Factor ที่ได้สามารถนำมาอธิบายถึงระดับการปนเปื้อนของโลหะในตะกอนที่ศึกษา ได้ดังต่อไปนี้

- SEF ของทองแดงและโครเมียมทั้งสองสถานีมีค่าต่ำกว่าศูนย์ถึงมากกว่าศูนย์เล็กน้อย น่าจะแสดงถึงว่าปริมาณโลหะทั้งสองชนิดในตะกอนบริเวณนี้มีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ (Sinex and Wright, 1988)

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าอัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียมในตะกอน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของสถานีอ่าวระยอง และสถานีอ่าวแกลง

Core intervals (cm)	Cr/Alx10 ³		Cu/Alx10 ³		Pb/Alx10 ³	
	ระยอง	แกลง	ระยอง	แกลง	ระยอง	แกลง
0-2	8.86	13.66	3.04	5.36	4.24	4.66
2-4	8.19	11.77	3.68	4.82	5.15	4.39
4-6	10.61	12.60	3.54	4.89	4.91	4.86
6-8	7.75	13.38	2.82	5.26	5.55	5.13
8-10	10.17	12.34	3.42	5.46	4.70	4.83
10-12	10.31	13.54	3.68	4.89	5.35	4.76
12-14	9.93	13.40	3.31	5.32	4.17	4.78
14-16	9.56	14.41	3.29	4.99	4.55	4.89
16-18	9.30	11.94	3.06	5.10	5.15	4.70
18-20	8.82	11.60	3.53	4.46	4.25	4.18
20-22	8.85	12.69	3.32	5.05	5.00	4.78
22-24	8.84	12.89	3.57	5.15	4.88	4.86
24-26	8.60	12.74	3.49	5.03	3.90	4.92
26-28	8.92	11.88	3.81	4.61	4.25	4.20
28-30	8.61	12.36	3.73	4.28	4.70	4.23
30-32	7.02	13.46	2.93	5.24	4.31	4.69
32-34	7.55	12.32	3.21	4.79	4.84	4.53
34-36	8.36	12.79	3.77	5.03	4.45	4.6
36-38	8.42	11.53	3.85	5.28	4.71	4.68
38-42	8.08	11.90	3.61	4.70	4.47	4.29

หมายเหตุ สถานีอ่าวแกลงเก็บตัวอย่างตะกอนได้ลึก 40 ซม.

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าอัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียมในตัวอย่างตะกอนผิวหน้า อ่าวระยอง

ระยะทาง ห่างฝั่ง	สถานี	อัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียม		
		Cr	Cu	Pb
6 ก.ม.	B1	6.95	2.77	3.57
	B2	9.36	3.47	4.94
9 ก.ม.	B3	9.28	3.05	3.95
	C1	8.45	2.86	4.25
	C2	8.05	3.21	4.86
	C3	9.28	3.44	4.92

หมายเหตุ สถานี A1 ถึง A3 มีระยะห่างจากชายฝั่ง 3 ก.ม.

ลักษณะตัวอย่างตะกอนเป็นทราย ร่อนไม่ได้

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าอะลูมิเนียมบนพื้นที่ใบ จากแหล่งต่างๆ
ในจังหวัดระยองและจังหวัดใกล้เคียง

พื้นที่	Aluminium oxide (%)		ปริมาณ Al (%)	
	ก่อนล้าง	หลังล้าง	ก่อนล้าง	หลังล้าง
ระยอง				
เขาทับกวาง	-	32.77	-	17.35
เหนือ ม. พังราด	-	19.33	-	10.23
บ. ชำมะกอ	26.53		14.05	-
อ. แกลง				
เขาอีพิ้ง	-	23.78	-	12.59
อ. แกลง				
เขาลำพวน	-	21.76	-	11.52
อ. แกลง				
จันทบุรี				
หนองไทร	21.8	25.21	11.54	13.35
ท่าใหม่	28.09	-	14.87	-
วังโตนด	16.79	19.65	8.89	10.40
ท่าใหม่				
บ้านป่าแดง	25.8	31.27	13.66	16.55
แหลมสิงห์	22.21	-	11.76	-
แหลมสิงห์	19.32	20.96	10.23	11.10
ตราด				
ตะกวด อ.เมือง	13.52	18.77	7.16	9.94
ชำรึก อ.เมือง	-	24.08	-	12.75

หมายเหตุ การล้างใช้ตะแกรงขนาด 100 mesh
ที่มา กรมทรัพยากรธรณี (2521)

- SEF ของตะกั่วทั้งสองสถานนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกับหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งเล็กน้อย ซึ่งน่าจะแสดงถึง Enriched behaviour ของตะกั่วในตะกอนที่ศึกษา (Kemp et al., 1976 อ้างถึงใน Forstner and Wittmann, 1981) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสูตรการคำนวณแล้วมีข้อน่าสังเกต ดังนี้คือ

สูตรการคำนวณ

$$SEF = \frac{(E/AI)_{sample} - (E/AI)_{crust}}{(E/AI)_{crust}}$$

จากสูตรการคำนวณ SEF จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่ออัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียมของตะกอนมีค่าเท่ากับระดับเฉลี่ยของเปลือกโลก (E/AI sample เท่ากับ E/AI crust)

ค่า SEF จะมากกว่าศูนย์ได้ใน 2 กรณี ดังต่อไปนี้

1) ปริมาณโลหะในตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะอะลูมิเนียมในตะกอนมีค่าเท่ากับระดับเฉลี่ยของเปลือกโลก ซึ่งค่า SEF จะเท่ากับหนึ่ง เมื่อค่าโลหะในตะกอนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ลักษณะเช่นนี้ จะบ่งบอกถึง Enriched behaviour อย่างแท้จริง (ตารางที่ 5.12)

2) อะลูมิเนียมในตะกอนมีค่าต่ำ แม้ว่าโลหะที่ศึกษาจะมีค่าใกล้เคียงกับระดับเฉลี่ยของเปลือกโลก แต่กรณีนี้จะทำให้ SEF มีค่ามากกว่าศูนย์ขึ้นไปจนถึงมากกว่าหนึ่ง ซึ่งค่าตัวเลขดังกล่าว ไม่ได้แสดงว่าโลหะในตะกอนที่ศึกษาจะมี Enriched behaviour (ตารางที่ 5.13)

ลักษณะที่กล่าวในกรณีที่ 2. น่าจะได้แก่การแปลผลของตะกั่วในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากอะลูมิเนียมในตะกอนมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระดับเฉลี่ยอะลูมิเนียมของเปลือกโลก ตัวเลขผลการคำนวณ SEF จึงมีค่าสูงโดยไม่ได้แสดงถึง Enriched behaviour

อย่างไรก็ตามจากสองกรณีข้างต้นทำให้พอที่จะสรุปได้ว่าโลหะที่ศึกษาในตัวอย่างแห่ง ตะกอนทั้งสองสถานี ไม่ได้รับการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ เพราะค่า SEF ได้แสดงถึงแนวโน้มของ conservative behaviour ตลอดความลึก

อนึ่ง การแปลผลด้วย SEF โดยใช้อะลูมิเนียมที่มีค่าต่ำกว่าระดับเฉลี่ยของเปลือกโลก ถูกนำมาใช้ในการศึกษาบริเวณอ่าวไทยตอนบน ผลจากการศึกษาในครั้งนั้นพบ Enriched behaviour ของตะกั่วในตะกอนชั้นบนอายุน้อยกว่า 80 ปี (จิระ จตุรานนท์, 2526) ซึ่งการคำนวณครั้งนั้นใช้ค่าอะลูมิเนียมในตะกอนต่ำเพียง 1.34-4.91% จึงเป็นที่น่าสงสัยอยู่บ้างว่าค่า SEF ที่สูงนั้นจะมีสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์อย่างแน่นอนหรือไม่

ดังนั้น จึงเป็นที่น่าสนใจศึกษาต่อไปถึงชนิดและค่าเฉลี่ยของธาตุอ้างอิงที่เหมาะสม เพื่อช่วยให้การแปลผลด้วย Sediment Enrichment Factor มีความชัดเจนมากขึ้น ซึ่งอะลูมิเนียมอาจจะไม่ใช่ธาตุอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับโลหะทุกชนิดในพื้นที่ศึกษาก็ได้ (Din, 1992)

ตารางที่ 5.8 แสดงค่า Sediment Enrichment Factor ของตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ (เปรียบเทียบกับ Mean sediment)

Core intervals (cm) top - bottom	Sediment Enrichment Factor					
	Cr		Cu		Pb	
	ระยของ	แกลง	ระยของ	แกลง	ระยของ	แกลง
0-2	-0.11	0.37	-0.34	0.17	0.61	0.77
2-4	-0.18	0.18	-0.20	0.05	0.95	0.66
4-6	0.06	0.26	-0.23	0.07	0.86	0.84
6-8	-0.23	0.34	-0.38	0.15	1.10	0.94
8-10	0.02	0.23	-0.25	0.19	0.78	0.83
10-12	0.03	0.35	-0.20	0.07	1.03	0.80
12-14	-0.01	0.34	-0.28	0.16	0.58	0.81
14-16	-0.04	0.44	-0.28	0.09	0.72	0.85
16-18	-0.07	0.19	-0.33	0.11	0.95	0.78
18-20	-0.12	0.16	-0.23	-0.03	0.61	0.58
20-22	-0.12	0.27	-0.28	0.10	0.89	0.81
22-24	-0.12	0.29	-0.22	0.12	0.85	0.84
24-26	-0.14	0.27	-0.24	0.10	0.48	0.86
26-28	-0.11	0.19	-0.17	0.01	0.61	0.59
28-30	-0.14	0.24	-0.19	-0.07	0.78	0.60
30-32	-0.30	0.35	-0.36	0.14	0.63	0.78
32-34	-0.25	0.23	-0.30	0.05	0.83	0.72
34-36	-0.16	0.28	-0.18	0.10	0.69	0.74
36-38	-0.16	0.15	-0.16	0.15	0.78	0.77
38-42	-0.19	0.19	-0.21	0.03	0.69	0.63

หมายเหตุ สถานีอำเภอแกลงเก็บตัวอย่างตะกอนได้ลึก 40 ซม.

ตารางที่ 5.9 แสดงค่า Sediment Enrichment Factor ของตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ (เปรียบเทียบกับ Average shale)

Core intervals (cm) top - bottom	Sediment Enrichment Factor					
	Cr		Cu		Pb	
	ระยอง	แกลง	ระยอง	แกลง	ระยอง	แกลง
0-2	-0.21	0.21	-0.46	-0.05	0.70	0.86
2-4	-0.27	0.05	-0.35	-0.14	1.06	0.76
4-6	-0.06	0.12	-0.37	-0.13	0.96	0.94
6-8	-0.31	0.19	-0.50	-0.07	1.22	1.05
8-10	-0.10	0.10	-0.39	-0.03	0.88	0.93
10-12	-0.08	0.20	-0.35	-0.13	1.14	0.90
12-14	-0.12	0.19	-0.41	-0.05	0.67	0.91
14-16	-0.15	0.28	-0.42	-0.11	0.82	0.96
16-18	-0.17	0.06	-0.46	-0.09	1.06	0.88
18-20	-0.22	0.03	-0.37	-0.21	0.70	0.67
20-22	-0.21	0.13	-0.41	-0.10	1.00	0.91
22-24	-0.21	0.15	-0.37	-0.09	0.95	0.94
24-26	-0.24	0.13	-0.38	-0.11	0.56	0.97
26-28	-0.21	0.06	-0.32	-0.18	0.70	0.68
28-30	-0.23	0.10	-0.34	-0.24	0.88	0.69
30-32	-0.38	0.20	-0.48	-0.07	0.72	0.88
32-34	-0.33	0.09	-0.43	-0.15	0.94	0.81
34-36	-0.26	0.14	-0.33	-0.11	0.78	0.84
36-38	-0.25	0.02	-0.32	-0.06	0.88	0.87
38-42	-0.28	0.06	-0.36	-0.17	0.79	0.72

หมายเหตุ สถานีอำเภอแกลงเก็บตัวอย่างตะกอนได้ลึก 40 ซม.

ตารางที่ 5.10 แสดงค่า Sediment Enrichment Factor ของโลหะในตะกอนผิวหน้า อำวระยอง (เปรียบเทียบกับ Mean sediment)

ระยะทาง ห่างฝั่ง	สถานี	Sediment Enrichment Factor		
		Cr	Cu	Pb
6 ก.ม.	B1	-0.30	-0.39	0.35
	B2	-0.06	-0.24	0.87
9 ก.ม.	B3	-0.07	-0.33	0.50
	C1	-0.15	-0.38	0.61
	C2	-0.20	-0.30	0.84
	C3	-0.07	-0.25	0.86

หมายเหตุ สถานี A1 ถึง A3 มีระยะห่างจากชายฝั่ง 3 ก.ม.
ลักษณะตัวอย่างตะกอนเป็นทราย ร่อนไม่ได้

ตารางที่ 5.11 แสดงค่า Sediment Enrichment Factor ของโลหะในตะกอนผิวหน้า อำวระยอง (เปรียบเทียบกับ Average shale)

ระยะทาง ห่างฝั่ง	สถานี	Sediment Enrichment Factor		
		Cr	Cu	Pb
6 ก.ม.	B1	-0.38	-0.15	0.43
	B2	-0.17	-0.38	0.98
9 ก.ม.	B3	-0.17	-0.46	0.58
	C1	-0.25	-0.49	0.70
	C2	-0.28	-0.43	0.94
	C3	-0.17	-0.39	0.97

หมายเหตุ สถานี A1 ถึง A3 มีระยะห่างจากชายฝั่ง 3 ก.ม.
ลักษณะตัวอย่างตะกอนเป็นทราย ร่อนไม่ได้

ตารางที่ 5.12 แสดงค่า Sediment Enrichment Factor เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในตะกอนมีค่าต่างๆ ขณะที่ปริมาณโลหะเท่ากับค่าเฉลี่ยของ mean sediment

Al (%)	Cr/Al $\times 10^3$	SEF	Cu/Al $\times 10^3$	SEF	Pb/Al $\times 10^3$	SEF
10.2	7.06	-0.29	3.24	-0.29	1.86	-0.29
9.2	7.83	-0.22	3.59	-0.22	2.07	-0.22
7.2	10.00	0.00	4.58	0.00	2.64	0.00
6.2	11.61	0.16	5.32	0.16	3.06	0.16
5.2	13.85	0.38	6.35	0.39	3.65	0.38
4.2	17.14	0.71	7.86	0.72	4.52	0.71
3.2	22.50	1.25	10.31	1.25	5.94	1.25

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยของโครเมียม ทองแดง และตะกั่วใน mean sediment มีค่าเท่ากับ 72 , 33 และ 19 ไมโครกรัมต่อกรัมตามลำดับ

ตารางที่ 5.13 แสดงค่า Sediment Enrichment Factor เมื่อใช้ค่าเฉลี่ยอะลูมิเนียมของ mean sediment ในการคำนวณ ขณะที่ปริมาณโลหะในตะกอนมีค่าต่างๆ

Cr	Cr/Al $\times 10^3$	SEF	Cu	Cu/Al $\times 10^3$	SEF	Pb	Pb/Al $\times 10^3$	SEF
50	6.9	-0.31	20	2.78	-0.39	10	1.39	-0.47
72	10	0.00	33	4.58	0.00	19	2.64	0.00
150	20.83	1.08	50	6.94	0.52	40	5.56	1.11
200	27.78	1.78	100	13.89	2.03	60	8.33	2.16
250	34.72	2.47	150	20.83	3.55	80	11.11	3.21
300	41.67	3.17	200	27.78	5.07	100	13.89	4.26

หมายเหตุ Al มีค่าคงที่เท่ากับ 7.2 %

5.7 ประวัติการสะสมโลหะในตะกอน ที่ระดับความลึกต่างๆ

ด้วยข้อจำกัดด้านการเปรียบเทียบปริมาณโลหะในตะกอนระหว่างสองบริเวณ (Araujo, Bernard, and Grieken, 1988; Fatima et al., 1988) ทำให้เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาโลหะในตะกอนที่ทับถมกันตามความลึกมากขึ้น เพราะเป็นไปได้มากกว่าตะกอนชั้นต่างๆ ซึ่งทับถมกันอยู่ที่ใดที่หนึ่งนั้นจะมีที่มาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน เมื่อเป็นเช่นนั้น ปริมาณโลหะที่สะสมอยู่ในตะกอนที่ระดับความลึกต่างๆ ย่อมสะท้อนถึงลำดับเหตุการณ์บนพื้นทวีปตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และหากทราบอายุตะกอน ก็จะทำให้ได้ผลสรุปที่ชัดเจนว่า ปริมาณโลหะในตะกอนที่ระยะเวลาต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจากอดีตหรือไม่

การศึกษาดังนี้มีความสนใจผลกระทบจากการพัฒนาอุตสาหกรรมที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของโลหะในตะกอนใกล้ฝั่ง ซึ่งจากหลักฐานข้อมูลเกี่ยวกับโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดระยอง และจังหวัดใกล้เคียงที่สามารถสืบค้นย้อนหลังได้ มีเพียงรายงานการสำรวจของกรมพัฒนาที่ดินซึ่งกล่าวถึงประเภทโรงงานอุตสาหกรรมของจังหวัดระยองในอดีตว่าเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ โรงงานน้ำตาล, โรงงานแป้งมัน, โรงสีข้าว, โรงน้ำแข็ง, และอุตสาหกรรมขนาดเล็กอื่นๆ ได้แก่ อู่ต่อและซ่อมเรือ, อู่ซ่อมรถยนต์ เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2527)

นอกจากนี้ จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเริ่มจัดทำในปีพ.ศ.2516 นั้น ได้รายงานประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตแต่ไม่ได้แยกจำนวนในแต่ละประเภทไว้ เพียงแต่สรุปว่ามีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดระยองในปีพ.ศ.2537 รวม 937 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2538) ดังนั้น ประวัติการเพิ่มขึ้นโรงงานทั้งชนิดและปริมาณจึงยังไม่ชัดเจนนัก

อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังนี้ใช้เกณฑ์การพิจารณาจากช่วงระยะเวลาที่เริ่มมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทยอย่างจริงจัง ตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับแรก ซึ่งประกาศใช้ในปี พ.ศ.2504 และพ.ร.บ.ส่งเสริมการลงทุนเพื่อกิจการอุตสาหกรรมในปี พ.ศ.2503 หรือประมาณ 40-50 ปีที่ผ่านมา โดยการลงทุนทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงตลอดมา (การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, 2536) สำหรับระยะเวลาการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกซึ่งประกอบขึ้นด้วยโรงงานขนาดใหญ่หลายประเภทซึ่งคาดว่าจะมีผลกระทบต่อปริมาณโลหะในทะเลนั้น เริ่มดำเนินการในช่วงเวลาประมาณ 10 ปี ที่ผ่านม่านั้น

การเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะในตัวอย่างแห่งตะกอนของสถานีอำเภอแกลง และสถานีอ่าวระยอง ที่ระยะเวลาต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

สถานีอำเภอแกลงมีระยะทางห่างจากชายฝั่งประมาณ 40 กิโลเมตร ค่าอัตราการสลายตัวของ Pb-210 ในตะกอนชั้นบนตั้งแต่ 0.0-6.0 ซม. มีลักษณะสูงต่ำ ทำให้ไม่สามารถหาอายุได้แน่นอน เพียงแต่ประมาณได้ว่าตะกอนช่วงนี้มีอายุน้อยกว่า 546 ปี ซึ่งน่าจะเป็นเพราะตะกอนช่วงบนได้รับอิทธิพลจากกระบวนการตามธรรมชาติ ได้แก่ physical mixing และ bioturbation (Cullen, 1973 อ้างถึงใน

Robbin and Edgington, 1975) ตะกอนชั้นล่างที่สามารถวัดค่าอัตราการสลายตัวของ Pb-210 ได้ อยู่ใน ช่วงความลึกตั้งแต่ 16.0-18.0 ซม. อายุตะกอน 123.8 ปี จึงพอจะกล่าวได้ว่าค่าโลหะในตะกอนที่ศึกษา ของสถานีอำเภอแก่งที่ช่วงความลึกดังกล่าวลงมาจนถึงชั้นล่างสุด (ความลึก 18.0-40.0 ซม.) เป็นค่า พื้นฐานตามธรรมชาติ (baseline)

สถานีอ่าวระยองมีระยะห่างจากชายฝั่งประมาณ 20 กิโลเมตร ซึ่งคาดว่าจะ เป็นบริเวณที่ ได้รับอิทธิพลการแพร่ของโลหะที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์บนพื้นทวีป ตะกอนชั้นบนตั้งแต่ 0.0-2.0 ซม. ประมาณได้ว่ามีอายุน้อยกว่า 10 ปี ตะกอนชั้นล่างที่สามารถวัดค่าอัตราการสลายตัวของ Pb-210 ได้ อยู่ใน ช่วงความลึก 30.0- 32.0 ซม. อายุตะกอนประมาณ 150 ปี (ตารางที่ 5.1) ซึ่งเป็นระยะเวลา ก่อนการ พัฒนาอุตสาหกรรม ดังนั้น จึงพอจะกล่าวได้ว่าค่าโลหะในตะกอนที่ช่วงความลึกดังกล่าวลงมาจนถึง ชั้นล่างสุด (32.0 ซม.- 42.0 ซม.) เป็นค่าพื้นฐานตามธรรมชาติ (baseline)

การเปลี่ยนแปลงตามความลึกของปริมาณโลหะที่สะสมอยู่ในตัวอย่างแท่งตะกอนทั้งสอง สถานีซึ่งมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

โครเมียม

ปริมาณโครเมียม (carbonate-free basis) ในตัวอย่างแท่งตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงตาม ความลึก อยู่ใน ช่วง 42.5-59.3 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับสถานีอ่าวระยอง และ 58.3-69.7 ไมโครกรัมต่อ กรัม สำหรับสถานีอำเภอแก่ง ตามลำดับ (ตารางที่ 5.3)

ปริมาณโครเมียมในตะกอนที่มีอายุน้อยกว่า 50 ปี (สถานีอ่าวระยองช่วงความลึก 0.0 - 12.0 ซม. และสถานีอำเภอแก่งช่วงความลึก 0.0-6.0 ซม.) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่มีการพัฒนา ด้าน อุตสาหกรรมในประเทศไทย(40-50ปีที่ผ่านมา) เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนชั้นล่างซึ่งเป็นตัวแทนของอดีต ก่อนยุคการพัฒนาอุตสาหกรรม (ตะกอนสถานีอ่าวระยองช่วงความลึกตั้งแต่ 12.0 ซม.ลงมา และสถานี อำเภอแก่งช่วงความลึก 6.0 ซม.ลงมาจนถึงชั้นล่างสุด) ไม่พบแนวโน้มลักษณะความแตกต่างที่ชัดเจน

พิจารณาปริมาณโครเมียมในตะกอนที่มีอายุน้อยกว่า 10.2 ปี ของสถานีอ่าวระยอง (ช่วง 0-4 ซม.) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่มีการพัฒนาอุตสาหกรรมบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก และปริมาณ โครเมียมในตะกอนผิวหน้าซึ่งเป็นตัวแทนที่ทับถมในยุคปัจจุบัน ตามระยะทางที่ห่างฝั่งออกมา 6 ก.ม และ 9 ก.ม. เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโครเมียมในตะกอนชั้นล่างที่มีอายุมากกว่า (ตะกอนช่วงความ ลึก 4.0 ซม. ลงไปจนถึงชั้นล่างสุดคือ 42.0 ซม.) ไม่พบลักษณะความแตกต่างที่ชัดเจนเช่นเดียวกัน

สันนิษฐานถึงสาเหตุที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นของโครเมียมว่า ในระยะแรกของการพัฒนา ด้าน อุตสาหกรรมนั้น แม้ว่าจะมีข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีการบำบัดของเสีย แต่เนื่องจากโรงงานยังมีจำนวน น้อยและเป็นโรงงานขนาดย่อม โครเมียมที่ปลดปล่อยออกมาจึงไม่มากพอที่ทำให้มีการสะสมเพิ่มขึ้นใน

ตะกอน ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาอุตสาหกรรมบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกซึ่งประกอบด้วยโรงงานขนาดใหญ่ผลิตแผ่นเหล็กชุบตีบุกและโครเมียม ปริมาณน้ำทิ้งเฉลี่ยสูงถึงวันละ 2,500 ลูกบาศก์เมตร (ภาคผนวก ค) แต่ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการบำบัดของเสีย ความสามารถในการจัดการดำเนินงาน และบำรุงรักษาระบบบำบัด ประกอบกับการกำกับดูแลที่มีประสิทธิภาพของรัฐ ทำให้น้ำทิ้งที่ระบายออกมามีปริมาณโครเมียมเหลืออยู่ในระดับต่ำ ซึ่งถูกเจือจางลงอีกโดยกระแสน้ำเมื่อลงสู่ทะเล ความเป็นไปได้อีกกรณีหนึ่งคือ อาจมีการเพิ่มขึ้นของโครเมียมในแหล่งตะกอนที่ศึกษาในครั้งนี้น้ำยังแต่อยู่ในระดับต่ำ ในกรณีนี้เกิดขึ้นได้ถ้าอัตราการตกตะกอนมีค่าสูง โลหะที่เพิ่มขึ้นจะถูกเจือจางด้วยองค์ประกอบต่างๆ ของตะกอน จนไม่สามารถวัดความแตกต่างจากระดับธรรมชาติได้ (Bertine, 1976; Keinonen, Kansanen, and Jaakkola, 1989) หรืออาจเป็นไปได้ว่าโลหะที่ลงสู่ทะเลในบริเวณนี้มีการเคลื่อนย้ายไปสะสมอยู่ที่อื่น

เมื่อเปรียบเทียบในระหว่างสองสถานีแล้วพบว่า ปริมาณโครเมียมในตะกอนสถานีอำเภอแก่งมีค่ามากกว่าสถานีอำวระยอง คาดว่าสาเหตุส่วนหนึ่งน่าจะเนื่องมาจากอิทธิพลด้านขนาดอนุภาค โดยสถานีอำเภอแก่งมีอนุภาคตะกอนขนาดเล็กในช่วง clay size มากกว่า ซึ่งปริมาณโลหะส่วนใหญ่ มักจะมีความสัมพันธ์กับตะกอนขนาดเล็ก (Din, 1995)

เมื่อประเมินระดับการปนเปื้อนด้วยอัตราส่วนโลหะต่ออะลูมิเนียมแล้ว พบว่าค่า SEF ไม่แสดงแนวโน้มว่ามีการปนเปื้อนตลอดแนวความลึกทั้งสองสถานี (ตารางที่ 5.8 และ 5.9) ซึ่งน่าจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าตัวอย่างแท่งตะกอนที่ศึกษาไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอะลูมิเนียมที่ใช้ในการปรับค่า(normalize) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอนุภาคตะกอนที่มีขนาดเล็กเช่นเดียวกับโลหะทั่วไป จึงน่าจะมีการศึกษาถึงชนิดและค่าเฉลี่ยของธาตุอ้างอิง เพื่อช่วยในการแปลผลอย่างเหมาะสมต่อไป

ทองแดง

ปริมาณทองแดง (carbonate-free basis) ของตัวอย่างแท่งตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกอยู่ในช่วง 17.6-21.7 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับสถานีอำวระยอง และ 23.2-27.3 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับสถานีอำเภอแก่ง ตามลำดับ (ตารางที่ 5.3)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่มีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทย (40-50 ปีที่ผ่านมา) และระยะเวลาที่มีการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก (10 ปีที่ผ่านมา) กับปริมาณทองแดงในตัวอย่างแท่งตะกอนที่ระดับความลึก(อายุ) สอดคล้องกัน ไม่พบว่ามีแนวโน้มความแตกต่างที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนชั้นล่าง เช่นเดียวกับโครเมียม

ที่เป็นเช่นนี้ สันนิษฐานว่า แม้จะมีการพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดใหญ่หลายประเภท บริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก ซึ่งทองแดงถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยสังเคราะห์ (rayon), แผงวงจรไฟฟ้า (electroplating) (Camusso, Tartari, and Zirino, 1989) โดยเฉพาะมีการใช้ทองแดงในระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อเป็นสารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion) (Hilal, 1987; Lyngby, 1989) สาเหตุที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นของทองแดงในตะกอน อาจเป็นไปได้ด้วยเหตุผลในลักษณะเดียวกับโครเมียม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองสถานีพบว่า ปริมาณทองแดงของสถานีอำเภอแก่งมีค่ามากกว่าสถานีอ่าวระยอง คาดว่าสาเหตุส่วนหนึ่งน่าจะเนื่องมาจากอิทธิพลขององค์ประกอบเชิงขนาด เช่นเดียวกับโครเมียม

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนทองแดงต่ออะลูมิเนียม พบว่าค่า SEF ไม่แสดงแนวโน้มว่า แท่งตะกอนที่ศึกษาได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน (ตารางที่ 5.8 และ 5.9) ซึ่งอาจเป็นไปได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับโครเมียม

ตะกั่ว

ปริมาณตะกั่ว (carbonate-free basis) ของตัวอย่างแท่งตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกอยู่ในช่วง 23.1-29.7 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับสถานีอ่าวระยอง และ 21.7-25.8 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับสถานีอำเภอแก่ง (ตารางที่ 5.3)

ปริมาณตะกั่วในตะกอนชั้นบนที่มีอายุอยู่ในระยะเวลาการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศไทย และการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนชั้นล่างแล้วไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนเช่นเดียวกับโครเมียมและทองแดง แม้ว่าตะกั่วจะถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น พิวซี และอุตสาหกรรมพลาสติกอื่นๆ เซรามิกส์ แก้ว เป็นต้น (Wakeman, 1977) ในกรณีนี้ถ้าตะกั่วในตะกอนมีแหล่งกำเนิดมาจากชายฝั่งโดยตรง สาเหตุที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นของตะกั่วในตะกอน อาจเป็นไปได้ว่ามีเหตุผลเช่นเดียวกับโครเมียมและทองแดง

อย่างไรก็ตาม ตะกั่วหรือโลหะบางชนิดที่สะสมอยู่ในตะกอนทะเลบางส่วน มีแหล่งกำเนิดมาจากพื้นที่ทวีปและถูกนำลงสู่ทะเลโดยมีลมเป็นตัวกลาง (Duce *et al.*, 1976; Trefry and Presley, 1976) การศึกษาครั้งนี้ ไม่พบการเพิ่มขึ้นของตะกั่วในตะกอนที่มีอายุประมาณ 80 ปีขึ้นมา (ตะกอนสถานีอ่าวระยองช่วงความลึก 16.0-18.0 ซม. และสถานีอำเภอแก่งช่วงความลึก 8.0-10.0 ซม.) ขณะที่บริเวณอ่าวไทยตอนบนพบ enriched behaviour ของตะกั่วในตะกอนที่มีอายุตั้งแต่ 80 ปี ซึ่งเป็นระยะเวลาที่มีการใช้รถยนต์ในประเทศไทย (จิระ จตุรานนท์, 2526) จึงเป็นไปได้ว่าอากาศซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญในการเคลื่อนย้ายอาจพัดพาตะกั่วไปตกยังบริเวณที่ห่างไกลจากอ่าวระยอง ดังเช่นมีการศึกษาพบว่าตะกั่วสามารถแพร่ไปได้ไกลกว่า 100 ไมล์จากแหล่งกำเนิดบนพื้นที่ทวีป (Murray and Ku, 1977)

และมีการศึกษาพบว่าอากาศสามารถพัดพาสิ่งสกปรกไปยังบริเวณที่ห่างจากเมือง Melbourne ถึง 180 กิโลเมตร (Smith and Halminton, 1989)

ปริมาณตะกั่วในตะกอนของสถานีอำเภอแก่งมีค่าน้อยกว่าสถานีอำเภอระยอง แม้ว่าสถานีอำเภอแก่งจะมีขนาดอนุภาคตะกอนในช่วงของ clay size มากกว่า สันนิษฐานได้ว่า ตะกั่วมีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคในระดับที่น้อยกว่าโลหะชนิดอื่น (Donazzolo *et al.*, 1981) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ มีกลไกในการเข้าไปสะสมที่แตกต่างจากโลหะชนิดอื่นนั่นเอง

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนตะกั่วต่ออะลูมิเนียมแล้ว พบว่าค่า SEF ไม่แสดงแนวโน้มว่าแท่งตะกอนที่ศึกษาจะได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน (ตารางที่ 5.8 และ 5.9) เช่นเดียวกับโครเมียมและทองแดง อย่างไรก็ตาม น่าจะมีการศึกษาถึงชนิดและค่าเฉลี่ยของธาตุอ้างอิงที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการแปลผลต่อไป ดังที่ได้กล่าวแล้วในข้างต้น