

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ผลการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , Ra_{eq} , D และ Annual effective dose ในตัวอย่างดิน

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)
1	8 ± 27	62 ± 24	414 ± 83	130	59	0.07
2						
3						
4	130 ± 26	100 ± 22	571 ± 79	318	145	0.18
5						
6						
7						
8	35 ± 23	N/D	340 ± 72	61	30	0.04
9						
10						
11						
12	73 ± 28	59 ± 24	336 ± 84	184	84	0.10
13						
14						
15						
16	97 ± 29	43 ± 23	296 ± 83	180	83	0.10
17						
18						
19						
20						
21	100 ± 30	157 ± 26	968 ± 93	399	181	0.22
22						

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)
23						
24	84 ± 29	170 ± 27	722 ± 90	383	172	0.21
25						
26						
27						
28	71 ± 26	136 ± 23	466 ± 77	302	134	0.16
29						
30						
31						
32						
33	75 ± 25	25 ± 20	348 ± 74	137	64	0.08
34						
35						
36	39 ± 25	128 ± 23	599 ± 78	267	120	0.15
37						
38						
39	142 ± 30	78 ± 24	219 ± 84	271	122	0.15
40						
41						
42	82 ± 25	75 ± 21	670 ± 79	240	111	0.14
43						
44						
45	203 ± 32	178 ± 27	1064 ± 96	539	245	0.30
46						
47						

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)
48						
49	104 ± 29	101 ± 25	1191 ± 95	340	159	0.19
50						
51						
52						
53	148 ± 30	46 ± 23	N/D	214	96	0.12
54						
55	64 ± 24	12 ± 19	80 ± 70	88	40	0.05
56						
57	66 ± 24	N/D	21 ± 68	68	31	0.04
58						
59	95 ± 26	102 ± 22	526 ± 77	281	127	0.16
60						
61	146 ± 35	148 ± 30	833 ± 105	422	192	0.23
62						
63	197 ± 37	236 ± 32	488 ± 103	572	254	0.31
64						
65	41 ± 24	25 ± 20	140 ± 70	87	40	0.05
66						
67						
68						
69	102 ± 25	21 ± 20	329 ± 74	157	73	0.09
70						
71						
72						

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)
73	108 ± 26	94 ± 22	647 ± 79	292	134	0.16
74						
75						
76						
77						
78						
79	139 ± 26	54 ± 21	811 ± 81	280	131	0.16
80						
81						
82						
83						
84	84 ± 29	113 ± 25	441 ± 86	279	125	0.15
85						
86	57 ± 28	115 ± 25	1111 ± 94	307	142	0.17
87						
ค่าเฉลี่ย (26)	96 ± 18	88 ± 23	524 ± 127	261 ± 51	119 ± 23	0.15 ± 0.03
มาตรฐาน	90	86	477	275	124	0.15

N/D = non detectable

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 ผลการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , Ra_{eq} , D , Annual effective dose, H_{ex} และ H_{in} ในตัวอย่างหิน

หมายเลข ตัวอย่าง	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
1 ^g	7.7 ± 1.7	27.8 ± 4.6	2.6 ± 0.2	95 ± 21	113 ± 19	819 ± 67	320	146	0.18	0.86	1.12
2 ^s	4.2 ± 2.0	18.6 ± 5.3	2.8 ± 0.3	52 ± 25	76 ± 21	869 ± 81	227	106	0.13	0.61	0.76
3 ^s	4.5 ± 2.0	18.2 ± 5.2	2.2 ± 0.3	55 ± 25	74 ± 21	695 ± 78	214	99	0.12	0.58	0.73
4 ^l	3.0 ± 1.4	2.0 ± 3.5	0.3 ± 0.2	37 ± 18	8 ± 14	105 ± 57	57	26	0.03	0.15	0.25
5 ^l	2.0 ± 1.4	5.1 ± 3.6	0.1 ± 0.2	25 ± 17	21 ± 14	18 ± 50	56	25	0.03	0.15	0.22
6 ^g	5.0 ± 2.0	19.6 ± 5.3	2.2 ± 0.3	62 ± 25	80 ± 21	691 ± 79	229	106	0.13	0.62	0.79
7 ^l	2.5 ± 1.4	N/D	N/D	31 ± 17	N/D	N/D	31	15	0.02	0.09	0.17
8 ^l	1.4 ± 1.5	8.7 ± 4.0	0.5 ± 0.2	18 ± 19	35 ± 16	151 ± 57	80	36	0.04	0.22	0.26
9 ^l	2.0 ± 1.3	7.6 ± 3.4	0.4 ± 0.2	25 ± 16	31 ± 14	137 ± 48	79	36	0.04	0.21	0.28
10 ^s	6.3 ± 2.0	20.1 ± 5.3	2.7 ± 0.3	78 ± 25	82 ± 22	821 ± 80	258	120	0.15	0.70	0.91

ตาราง ข-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H _{ex}	H _{in}
11 ^s	2.2 ± 1.6	10.5 ± 4.1	0.7 ± 0.2	27 ± 19	43 ± 17	232 ± 58	106	48	0.06	0.29	0.36
12 ^l	2.4 ± 1.4	6.1 ± 3.6	0.5 ± 0.2	30 ± 18	25 ± 15	162 ± 52	78	35	0.04	0.21	0.29
13 ^s	5.6 ± 1.5	22.3 ± 4.1	3.4 ± 0.2	69 ± 19	90 ± 17	1055 ± 64	279	130	0.16	0.75	0.94
14 ^s	4.5 ± 1.5	13.0 ± 3.8	4.2 ± 0.2	56 ± 18	53 ± 16	1305 ± 67	231	112	0.14	0.63	0.78
15 ^s	9.2 ± 1.7	N/D	2.0 ± 0.2	113 ± 21	N/D	605 ± 64	160	78	0.10	0.43	0.74
16 ^l	0.9 ± 1.3	0.7 ± 3.1	0.1 ± 0.1	11 ± 16	3 ± 13	31 ± 45	18	8	0.01	0.05	0.08
17 ^l	N/D	7.7 ± 3.6	0.5 ± 0.2	N/D	31 ± 15	163 ± 51	57	26	0.03	0.15	0.15
18 ^l	3.9 ± 1.5	20.7 ± 4.0	2.1 ± 0.2	48 ± 18	84 ± 16	638 ± 59	218	100	0.12	0.59	0.72
ค่าเฉลี่ย (18)	3.7 ± 1.1	11.6 ± 4.0	1.5 ± 0.6	46 ± 14	47 ± 16	472 ± 187	150 ± 45	70 ± 21	0.09 ± 0.03	0.41 ± 0.12	0.53 ± 0.15
มาตรฐาน	3.5	9.6	1.4	43	39	419	133	63	0.08	0.36	0.54

N/D = non detectable

^sหินแกรนิต (granite), ^sหินทรายแป้ง (siltstone), ^lหินปูน (limestone)

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ผลการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , Ra_{eq} , D , Annual effective dose, H_{ex} และ H_{in} ในตัวอย่างทราย

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
1	60 ± 20	30 ± 16	547 ± 63	145	132	0.65	0.39	0.55
2	21 ± 19	40 ± 16	412 ± 60	111	97	0.48	0.30	0.36
3	51 ± 20	35 ± 16	231 ± 58	118	103	0.51	0.32	0.46
4	3 ± 19	80 ± 18	226 ± 58	135	109	0.53	0.36	0.37
5	55 ± 20	37 ± 16	742 ± 65	165	151	0.74	0.45	0.60
6	37 ± 20	63 ± 17	448 ± 61	162	139	0.68	0.44	0.54
7	20 ± 19	27 ± 16	189 ± 57	74	64	0.31	0.20	0.25
8	15 ± 19	68 ± 17	636 ± 63	160	139	0.68	0.43	0.47
9	55 ± 20	32 ± 16	462 ± 61	136	123	0.60	0.37	0.52
10	38 ± 19	14 ± 16	102 ± 56	66	58	0.29	0.18	0.28

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra 19 (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
11	56 ± 20	26 ± 16	137 ± 57	104	91	0.45	0.28	0.43
12	24 ± 19	22 ± 16	184 ± 57	71	62	0.30	0.19	0.26
13	33 ± 19	46 ± 17	606 ± 63	146	130	0.64	0.39	0.48
14	25 ± 19	56 ± 17	578 ± 63	150	131	0.64	0.40	0.47
15	42 ± 20	75 ± 17	683 ± 64	202	176	0.86	0.55	0.66
16	37 ± 20	83 ± 18	644 ± 64	205	177	0.87	0.55	0.65
17	27 ± 19	54 ± 17	440 ± 61	138	119	0.58	0.37	0.44
18	38 ± 20	76 ± 18	666 ± 64	198	172	0.84	0.54	0.64
19	51 ± 20	37 ± 16	614 ± 63	152	137	0.67	0.41	0.55
20	56 ± 20	57 ± 17	690 ± 65	191	170	0.83	0.52	0.67
21	50 ± 20	16 ± 16	550 ± 62	115	107	0.53	0.31	0.44
22	37 ± 19	41 ± 17	716 ± 64	151	137	0.67	0.41	0.51

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
23	10 ± 19	55 ± 17	585 ± 62	135	117	0.57	0.36	0.39
24	59 ± 20	57 ± 17	691 ± 65	194	173	0.85	0.52	0.68
25	65 ± 20	50 ± 17	594 ± 63	182	162	0.79	0.49	0.67
26	46 ± 20	36 ± 16	609 ± 63	145	131	0.64	0.39	0.51
27	17 ± 19	91 ± 18	687 ± 64	200	171	0.84	0.54	0.59
28	73 ± 20	26 ± 16	486 ± 62	147	134	0.66	0.40	0.59
29	73 ± 20	65 ± 17	663 ± 65	218	192	0.94	0.59	0.79
30	34 ± 20	69 ± 17	644 ± 64	171	158	0.77	0.49	0.58
31	27 ± 20	77 ± 18	966 ± 68	212	187	0.92	0.57	0.64
32	91 ± 21	35 ± 16	396 ± 61	171	153	0.75	0.46	0.71
33	30 ± 19	56 ± 17	738 ± 65	167	148	0.73	0.45	0.53
34	22 ± 19	54 ± 17	182 ± 57	113	94	0.46	0.30	0.36

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
35	46 ± 20	42 ± 17	482 ± 62	143	127	0.62	0.39	0.51
36	44 ± 20	36 ± 16	113 ± 57	105	89	0.44	0.28	0.40
37	47 ± 20	61 ± 17	511 ± 62	174	152	0.74	0.47	0.60
38	44 ± 20	46 ± 17	470 ± 61	145	128	0.63	0.39	0.51
39	56 ± 20	34 ± 16	197 ± 58	119	104	0.51	0.32	0.47
40	50 ± 20	34 ± 16	610 ± 63	145	132	0.65	0.39	0.53
41	51 ± 20	56 ± 17	679 ± 64	183	163	0.80	0.49	0.63
42	78 ± 21	83 ± 18	759 ± 66	255	224	1.10	0.69	0.90
43	56 ± 20	25 ± 16	700 ± 64	149	138	0.68	0.40	0.56
44	63 ± 20	26 ± 16	670 ± 64	152	141	0.69	0.41	0.58
45	76 ± 20	58 ± 17	625 ± 64	208	184	0.90	0.56	0.77
46	56 ± 20	76 ± 18	753 ± 66	222	195	0.96	0.60	0.75

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
47	29 ± 19	57 ± 17	115 ± 57	119	98	0.48	0.32	0.40
48	21 ± 19	47 ± 17	665 ± 64	140	125	0.61	0.38	0.43
49	29 ± 19	33 ± 16	118 ± 56	86	73	0.36	0.23	0.31
50	44 ± 20	47 ± 17	142 ± 57	122	103	0.51	0.33	0.45
51	32 ± 19	34 ± 16	106 ± 56	90	76	0.37	0.24	0.33
52	48 ± 20	41 ± 16	150 ± 57	118	101	0.50	0.32	0.45
53	61 ± 20	46 ± 17	399 ± 61	157	139	0.68	0.42	0.59
54	36 ± 20	70 ± 17	916 ± 67	206	183	0.90	0.56	0.65
55	17 ± 19	78 ± 18	904 ± 67	198	174	0.85	0.53	0.58
56	20 ± 19	45 ± 17	600 ± 63	131	117	0.57	0.35	0.41
57	60 ± 20	56 ± 17	250 ± 59	160	137	0.67	0.43	0.59
58	32 ± 20	67 ± 17	351 ± 60	154	131	0.64	0.42	0.50

ตาราง ก-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Ra_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H_{ex}	H_{in}
59	25 ± 19	72 ± 17	540 ± 62	169	145	0.71	0.46	0.52
60	21 ± 19	53 ± 17	749 ± 65	154	137	0.67	0.42	0.47
61	33 ± 19	47 ± 17	667 ± 64	152	136	0.66	0.41	0.50
62	28 ± 19	52 ± 17	562 ± 62	146	129	0.63	0.40	0.47
ค่าเฉลี่ย (62)	42 ± 18	50 ± 18	509 ± 230	153 ± 39	134 ± 9	0.66 ± 0.04	0.41 ± 0.11	0.52 ± 0.63
มาตรฐาน	40	49	581	150	135	0.66	0.41	0.52

ภาคผนวก ง

ตาราง ง-1 ผลการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226 และค่าปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปีจากน้ำบ่อตื้น

หมายเลขตัวอย่าง	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ	ค่าปริมาณรังสีประสิทธิผล
	²²⁶ Ra (mBq/l)	ที่ร่างกายได้รับต่อปี (μ Sv)
1	179 ± 19	37
2	15 ± 8	3
3	26 ± 7	5
4	7 ± 7	2
5	14 ± 9	3
6	6 ± 7	1
7	5 ± 6	1
8	32 ± 7	7
9	20 ± 7	4
10	26 ± 8	5
11	14 ± 7	3
12	16 ± 8	3
13	5 ± 8	1
14	N/D	N/D
15	6 ± 7	1
16	17 ± 8	4
17	29 ± 11	6
18	4 ± 8	1
19	11 ± 6	2
20	11 ± 7	2
21	27 ± 6	6
22	28 ± 7	6
23	9 ± 6	2

ตาราง ง-1 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ	ค่าปริมาณรังสีประสิทธิผล
	^{226}Ra (mBq/l)	ที่ร่างกายได้รับต่อปี (μSv)
24	10 ± 5	2
25	N/D	N/D
26	45 ± 9	9
27	10 ± 7	2
28	N/D	N/D
29	25 ± 9	5
30	N/D	N/D
31	N/D	N/D
32	50 ± 9	10
33	27 ± 9	6
34	7 ± 12	2
35	37 ± 12	8
36	5 ± 8	1
37	2 ± 6	1
38	31 ± 10	6
39	N/D	N/D
40	36 ± 10	7
41	21 ± 9	4
42	28 ± 10	6
43	16 ± 7	3
44	N/D	N/D
45	4 ± 9	1
46	N/D	N/D
47	2 ± 8	1
48	N/D	N/D
49	16 ± 9	3

ตาราง ง-1 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ²²⁶ Ra (mBq/l)	ค่าปริมาณรังสีประสิทธิผล ที่ร่างกายได้รับต่อปี (μSv)
50	59 ± 9	12
51	5 ± 7	1
52	4 ± 9	1
53	4 ± 5	1
54	N/D	N/D
55	2 ± 7	1
ค่าเฉลี่ย (55)	17 ± 7	4 ± 1
มาตรฐาน	10	2

N/D = non detectable

ภาคผนวก จ

กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

Natural Radioactivity in Area of Nakhon Si Thammarat Province

ปรีดา นวลจริง¹ ธวัช ชิตตระการ² และ ไตรภพ ฝ่องสุวรรณ^{3*}

¹นักศึกษาลัทธิสุตร วท.ม. (ฟิสิกส์), ²Ph.D. (Nuclear Physics) รองศาสตราจารย์, ³Ph.D. (Applied Geophysics) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112.

^{3*} Corresponding e-mail : tripop.b@ratree.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่ จ. นครศรีธรรมราช โดยเก็บตัวอย่างดิน หิน ทราช และน้ำบ่อตื้น รวม 161 ตัวอย่าง วิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีแกมมา ผลการวิจัยพบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ในตัวอย่างดิน อยู่ในช่วง 8 – 203 (เฉลี่ย 96 ± 18) Bq/kg, 12 – 236 (เฉลี่ย 88 ± 23) Bq/kg และ 21 – 1191 (เฉลี่ย 524 ± 127) Bq/kg ตามลำดับ ในตัวอย่างหินมีค่าอยู่ในช่วง 11 – 113 (เฉลี่ย 46 ± 14) Bq/kg, 3 – 113 (เฉลี่ย 47 ± 16) Bq/kg และ 18 – 1305 (เฉลี่ย 472 ± 187) Bq/kg ตามลำดับ ในตัวอย่างทราชมีค่าอยู่ในช่วง 3 – 91 (เฉลี่ย 42 ± 5) Bq/kg, 14 – 91 (เฉลี่ย 50 ± 5) Bq/kg และ 102 – 966 (เฉลี่ย 509 ± 57) Bq/kg ตามลำดับ ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของดินใน 2 อำเภอมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ปลอดภัย 370 Bq/kg เมื่อประเมินความเสี่ยงการได้รับสัมผัสรังสีของประชาชนด้วยค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) จากการใช้วัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือน พบว่า ตัวอย่างหิน และทราช มีค่า H_{ex} และค่า H_{in} ไม่เกินระดับปลอดภัย การประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายนอกอาคาร บ้านเรือนของตัวอย่างดิน และหิน พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 119 ± 23 และ 70 ± 21 nGy/h ตามลำดับ การประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายในอาคารบ้านเรือนของตัวอย่างทราช พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 134 ± 9 nGy/h และจากการหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ในน้ำบ่อตื้น พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 2 – 179 mBq/l (เฉลี่ย 17 ± 7 mBq/l) โดยมีตัวอย่างน้ำบ่อตื้น 1 ตัวอย่าง จาก อ.เมือง ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 เท่ากับ 179 mBq/l ซึ่งสูงกว่าค่า MCL (111 mBq/l)

Abstract

This research work aims to study the specific activity of natural radioactivity in soil, rock, constructing sand and shallow well water samples in area of Nakhon Si Thammarat Province. Totally 161 samples were collected and analysed using gamma-ray spectrometry technique. The specific activities of Ra-226, Th-232 and K-40 in soil samples ranged from 8 to 203 (Mean 96 ± 18) Bq/kg, 12 to 236 (Mean 88 ± 23) Bq/kg and 21 to 1191 (Mean 524 ± 127) Bq/kg, in rock samples ranged from 11 to 113 (Mean 46 ± 14) Bq/kg, 3 to 113 (Mean 47 ± 16) Bq/kg and 18 to 1305 (Mean 472 ± 187) Bq/kg, in sand samples ranged from 3 to 91 (Mean 42 ± 5) Bq/kg, 14 to 91 (Mean 50 ± 5) Bq/kg and 102 to 966 (Mean 509 ± 57) Bq/kg, respectively. The radium equivalent activity of soil samples in 2 districts was found to be higher than the limit set in the OECD report (370 Bq/kg). The radiation hazard indices calculated for assessment of the radiation hazards arising due to the use of these rock and sand samples in the construction of dwellings were within the safety limits recommended by UNSCEAR. The estimated outdoor dose rates in soil and rock samples were averaged at 119 ± 23 and 70 ± 21 nGy/h, respectively. The estimated indoor dose rate in sand samples were averaged at 134 ± 9 nGy/h. The specific activities of Ra-226 in well water samples ranged from 2 to 179 (Mean 17 ± 7) mBq/l. Only one water sample from Muang district had the specific activity of Ra-226 of 179 mBq/l, which was higher than the MCL (111 mBq/l).

Key words : Natural Radioactivity, Radium-226, soil, rock, constructing sand, shallow well water, gamma-ray spectrometer

บทนำ

ในชีวิตประจำวันมนุษย์ได้รับสัมผัสกัมมันตภาพรังสีจากธรรมชาติที่มีอยู่ทั้งภายในและภายนอกร่างกาย การได้รับสัมผัสรังสีจากภายนอก (External Exposure) มาจากแหล่งกำเนิดที่มีอยู่ในธรรมชาติทั้งในดิน หิน และจากรังสีคอสมิกจากนอกโลกที่แผ่เข้ามายังชั้นบรรยากาศของโลก การได้รับสัมผัสกัมมันตภาพรังสีจากภายใน (Internal Exposure) มาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีในอาหาร ในน้ำที่เราบริโภคเข้าไป และจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอากาศ กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติจะพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน หิน พืช น้ำ และอากาศ (Malanca *et al.*, 1996) กัมมันตภาพรังสีในดินมาจากอนุกรมกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียมและ

โพแทสเซียมในธรรมชาติ (Singh *et al.*, 2005) โดยมี U-238 และ Th-232 เป็นนิวไคลด์แม่ของอนุกรมยูเรเนียมและทอเรียม ตามลำดับ ผลกระทบจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา ซึ่งเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (Ionizing Radiation) มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตคือ เมื่อมีการได้รับสัมผัสรังสีเข้าสู่ร่างกายจะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีการแตกตัว ซึ่งอาจทำให้เซลล์และระบบการทำงานของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป จนเกิดอาการผิดปกติในร่างกาย การได้รับสัมผัสรังสีจากธรรมชาติดังกล่าวแม้จะมีปริมาณไม่สูงมากนัก แต่หากเป็นการได้รับสัมผัสอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหลายสิบปี ก็อาจส่งผลกระทบในทางลบต่อสุขภาพได้ เนื่องจากไม่มีขีดเริ่มใดๆ ในการได้รับสัมผัสรังสีแล้วไม่เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ การได้รับสัมผัสรังสีปริมาณสูงขึ้นไปเพิ่มโอกาสที่จะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพมากขึ้นเป็นสัดส่วนกัน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องตรวจวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ เพื่อใช้ในการประเมินการได้รับสัมผัสกัมมันตภาพรังสีของประชาชน และตรวจสอบระดับความปลอดภัยจากรังสี

เนื่องจากการได้รับสัมผัสรังสีจากภายนอกของประชากรโลกโดยส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการแผ่รังสีจากธรรมชาติ (UNSCEAR, 1988) จากการประเมินปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อปีที่มนุษย์ได้รับสัมผัสจากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติมีค่าประมาณ 2.4 mSv (UNSCEAR, 2000) แบ่งเป็นการได้รับสัมผัสรังสีจากรังสีคอสมิก 0.4 mSv จากการแผ่รังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่บนพื้นโลก 0.5 mSv จากการหายใจโดยการสูดเอาเรดอนและนิวไคลด์ลูกที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอนเข้าสู่ร่างกาย 1.2 mSv และจากอาหารและน้ำที่เรารับบริโภคเข้าไป 0.3 mSv

สำหรับในประเทศไทย ผลการตรวจวัดอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนเฉลี่ยในอากาศจากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติของโลก (Terrestrial Gamma Radiation) มีค่าเท่ากับ 77 และ 48 nGy/h สำหรับภายนอก (Outdoor) และภายใน (Indoor) อาคารบ้านเรือน ตามลำดับ (UNSCEAR, 2000) ทั้งนี้การได้รับสัมผัสปริมาณรังสีจากภายนอกที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรม U-238, อนุกรม Th-232 และ K-40 ที่มีอยู่ในดิน หิน ตามลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่นั้นๆ (Quindos *et al.*, 1994)

ผลการตรวจวัดปริมาณยูเรเนียมสมมูล (equivalent Uranium) ในหินแกรนิตในภาคใต้ของประเทศไทย (Ishihara *et al.*, 1980) พบว่า หินแกรนิตที่เขากระช่องมีค่าความเข้มข้น 11 ppm ที่ อ.เมือง จ.สงขลา มีค่า 18 ppm นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดปริมาณยูเรเนียมในหินชนิดต่างๆ ในพื้นที่ จ.สงขลา พัทลุง และ ปัตตานี (สุขสวัสดิ์, 2537) พบว่า มีปริมาณยูเรเนียมสมมูลเฉลี่ยสำหรับหินแกรนิตเท่ากับ 18.43 ± 4.81 ppm สำหรับหินปูน 3.12 ± 2.83 ppm หินดินดาน 17.97 ± 3.53 ppm และหินทราย 1.28 ± 3.83 ppm เมื่อเปรียบเทียบปริมาณยูเรเนียมในหินแกรนิตที่มีค่า

18.43 ppm กับปริมาณยูเรเนียมในหินแกรนิตทั่วไปที่มีค่าเท่ากับ 4.8 ppm พบว่ามีค่าสูงกว่าถึง 4 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หินแกรนิตในพื้นที่ภาคใต้มีความเข้มข้นยูเรเนียมสูงกว่าหินทั่วไปมาก

จากการวิเคราะห์แผ่นกัมมันตภาพรังสีทางอากาศ (DMR, 1989) พบว่ามีบางพื้นที่ใน จ.นครศรีธรรมราช มีค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลที่ผิวดินสูงกว่า 4 ppm (Figure 1) ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometrical mean) ของความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลที่ผิวดินทั่วประเทศไทย ที่มีค่าเท่ากับ 2.1 ppm (ไทรภพ ผ่องสุวรรณ, ติดต่อบริษัท) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่นี้

รายงานวิจัยนี้เป็นผลการศึกษากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช ได้แก่ ยูเรเนียมสมมูล หรือ เรเดียม-226 (Ra-226) ทอเรียมสมมูล หรือทอเรียม-232 (Th-232) และ โพแทสเซียม-40 (K-40) ในตัวอย่างดิน หิน และทรายก่อสร้าง รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำบ่อต้น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา พื้นที่ศึกษาประกอบด้วย 6 อำเภอ 2 กิ่งอำเภอ ได้แก่ อ.เมือง อ.ฉวาง กิ่ง อ.ช้างกลาง อ.ลานสกา อ.ถ้ำพรรณรา อ.พิปูน อ.พรหมคีรี และ กิ่ง อ.นบพิตำ ซึ่งมีลักษณะทางธรณีวิทยาของหินประกอบด้วยหินแกรนิตมหายุคมีโซโซอิกในบริเวณตอนกลางวางตัวอยู่ในแนวเหนือใต้ ด้านทิศตะวันตกประกอบด้วยหินปูนยุคคอโควิเชียน ตะกอนยุคควอเทอร์นารี และหินดินดานยุคคาร์บอนิเฟอรัส ส่วนด้านทิศตะวันออกประกอบด้วยตะกอนควอเทอร์นารี ซึ่งวางตัวเป็นแนวกว้าง

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินได้ชั้นหน้าดินจำนวน 26 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินจำนวน 18 ตัวอย่าง ตัวอย่างทรายก่อสร้างจำนวน 62 ตัวอย่าง และตัวอย่างน้ำจากบ่อต้นจำนวน 55 บ่อ ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา Figure 2 แสดงตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่าง ตรวจสอบด้วยเครื่องบอกพิกัดภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม (Trimble Navigator, Basic Plus, USA) โดยในการเก็บตัวอย่างดินจะเก็บดินที่เป็นดินเดิมในพื้นที่ ตัวอย่างหินจะเก็บจากหิน โส่ ตัวอย่างทรายก่อสร้างจะเก็บจากจุดที่กำลังมีการก่อสร้างบ้านเรือน และน้ำบ่อต้นจะเก็บจากน้ำบ่อที่ใช้ในการบริโภคในครัวเรือน ซึ่งในแต่ละจุดจะเก็บน้ำจำนวน 20 ลิตร

2. การเตรียมตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง และน้ำบ่อต้น

นำตัวอย่างดิน และทรายก่อสร้างมาทำการคัดแยกแยกขยะออกจากตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น ส่วนตัวอย่างหินจะทำ

การบดละเอียดก่อนจะนำเข้าสู่อบ จากนั้นวางตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจะนำไปร่อนผ่านตะแกรง เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จากนั้นนำตัวอย่างดินจากจุดเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกัน 3-5 จุด มาผสมกันด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน ผสมให้เข้ากันเป็นอย่างดี จะได้เป็นตัวอย่างตัวแทนของแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง บรรจุใส่กระปุก ชั่งน้ำหนัก ปิดฝาให้สนิท

นำตัวอย่างน้ำบ่อตื้นจำนวน 20 ลิตร มาผ่านอุปกรณ์จับเรเดียมในน้ำที่ภายในบรรจุสารจับเรเดียมในน้ำ (สุภัทร, 2547; จเร, 2548) โดยให้ตัวอย่างน้ำผ่านสารจับเรเดียมด้วยอัตรา 2 ลิตร/นาที่ จากนั้นบรรจุสารจับเรเดียมที่เตรียมได้ลงในกระปุกพลาสติก ปิกนิกกระปุกตัวอย่างให้สนิท เพื่อเตรียมวัดรังสีแกมมาของเรเดียม-226 ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา

3. การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา

สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างดิน หิน และทรายก่อสร้างจะวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา ที่ใช้หัววัดผลึกโซเดียมไอโอไดต์ (Gammadata, Model GDM 10, Sweden) โดยหัววัดอยู่ในตำแหน่งกึ่งรัศมีหลังหนา 10 cm การปรับเทียบมาตรฐานเพื่อหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ทำโดยใช้สารอ้างอิงมาตรฐานของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) ได้แก่ IAEA RGU-1 (IAEA, 1987), IAEA RGTh-1 (IAEA, 1987) และ KCl (Merck, USA)

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้ ค่ากัมมันตภาพของยูเรเนียม คำนวณจากยอดพลังงานรังสีแกมมาของ Bi-214 ที่พลังงาน 1.76 MeV ค่ากัมมันตภาพของ ทอเรียม-232 คำนวณจากยอดพลังงานรังสีแกมมาของ Tl-208 ที่พลังงาน 2.62 MeV และสำหรับ โพแทสเซียม-40 คำนวณจากยอดพลังงาน 1.46 MeV แต่เนื่องจากในตัวอย่างที่ศึกษามักจะมีนิวไคลด์ทั้งสามร่วมกันอยู่ในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งทำให้มีการรบกวนรังสีแกมมาซึ่งกันและกัน จึงต้องทำการปรับแก้ผลการรบกวนรังสีแกมมาระหว่างนิวไคลด์ทั้งสามโดยใช้เทคนิค Compton Stripping (Chiozzi *et al.*, 2000) ผลการปรับแก้แสดงด้วยสมการปรับเทียบมาตรฐานสำหรับหาปริมาณ โพแทสเซียม เรเดียม และทอเรียม ในสารตัวอย่าง ดังสมการ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ

$$R_K (g) = 55.1R_1 - 43.9R_2 - 10.9R_3 \quad (1)$$

$$R_{Ra} (mg) = 0.2R_1 + 73.5R_2 - 34.3R_3 \quad (2)$$

$$R_{Th} (mg) = -1.3R_1 - 1.1R_2 - 259.7R_3 \quad (3)$$

เมื่อ R_K , R_{Ra} และ R_{Th} คือ ปริมาณโพแทสเซียม (g) เรเดียม (mg) และ ทอเรียม (mg) ในตัวอย่าง ตามลำดับ R_1 , R_2 และ R_3 เป็นอัตรานับรังสี (count per second) ในช่องพลังงาน 1.46, 1.76 และ 2.62 MeV ตามลำดับ

สเปกตรัมรังสีแกมมาของน้ำบ่อต้นจะถูกวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ติดตั้ง หัววัด HPGe (Canberra, Model GC1319, USA) ซึ่งอยู่ภายในถ้ำตะกั่วกำบังรังสีภูมิหลัง (Canberra, Model 747, USA) หัววัดมีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 13.9 % และมีกำลังแยก 1.75 keV ที่พลังงานรังสีแกมมาของ โคบอลต์-60 ที่ 1332 keV และมีอัตราส่วนระหว่างยอดพลังงานต่อฐานคอมพ์ตัน 44.8 : 1

การวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพของ เรเดียม-226 จำนวนจากยอดพลังงานรังสีแกมมาของ เรเดียม-226 ที่พลังงาน 186.2 keV ใช้เวลาวัดรังสี 21600 วินาที โดยได้ทำการปรับเทียบมาตรฐานระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ใช้ในการวิเคราะห์ เรเดียม-226 ที่ยอดพลังงาน 186.2 keV ด้วยสารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA RGU-1 โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.057430 cps/Bq ค่าประสิทธิภาพที่ได้นี้จะใช้ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพของ เรเดียม-226 ในสารตัวอย่างต่อไป

ค่ากัมมันตภาพต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ หรือค่าขีดจำกัดของการวัด (The Detection Limit; L_n) ของระบบสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จำนวนจากสูตรของ Rybach (1988) สำหรับระบบวัดที่ใช้หัววัด NaI(Tl) มีค่าขีดจำกัดของการวัดเท่ากับ 11, 4 และ 3 Bq สำหรับ โปแทสเซียม-40 เรเดียม-226 และทอเรียม-232 ตามลำดับ ส่วนระบบที่ใช้หัววัด HPGe มีค่าขีดจำกัดของการวัด เรเดียม-226 เท่ากับ 19 mBq

4. กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม

ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) เป็นค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักของกัมมันตภาพรังสีของทั้ง 3 นิวไคลด์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เรเดียม-226 ที่มีกัมมันตภาพ 370 Bq/kg จะให้ค่าอัตราปริมาณรังสีเทียบเท่า ทอเรียม-232 กัมมันตภาพ 259 Bq/kg หรือ โปแทสเซียม-40 กัมมันตภาพ 4810 Bq/kg ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม จำนวนได้จากสมการ (4)

$$Ra_{eq} = 370 \left(\frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \quad (4)$$

เมื่อ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ ค่ากัมมันตภาพเฉพาะในหน่วย Bq/kg ของ เรเดียม-226 ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ตามลำดับ

5. อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ

5.1 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายนอกอาคารบ้านเรือน

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ หรือโดส (D) จากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติของโลก สำหรับภายนอกอาคารบ้านเรือน (Outdoor) ที่วัดเหนือพื้นดิน 1 เมตร ซึ่งคำนวณจากค่ากัม

มันตกภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 โดยสมมติว่านิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดอื่นที่มีอยู่ในธรรมชาติอื่นๆ มีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ (Kocher, 1985) สามารถคำนวณโดสได้จากสมการ (5) (UNSCEAR, 2000)

$$D \text{ (nGy / h)} = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.0417A_K \quad (5)$$

5.2 อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศสำหรับภายในอาคารบ้านเรือน (Indoor)

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ หรือโดส (D) สำหรับภายในอาคารบ้านเรือน (Indoor) ที่วัดจากการอาศัยอยู่ภายในบ้าน หรือภายในอาคารที่สร้างด้วยวัสดุก่อสร้างที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีปะปนอยู่ คำนวณค่าโดสได้จากค่ากัมมันตกภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ที่มีในวัสดุก่อสร้าง คำนวณได้จากสมการ (6) (EC, 1999)

$$D \text{ (nGy / h)} = 0.92A_{Ra} + 1.1A_{Th} + 0.08A_K \quad (6)$$

เมื่อ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ ค่ากัมมันตกภาพจำเพาะในหน่วย Bq/kg ของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ตามลำดับ

6. ดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกและภายในร่างกาย

ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) โดยกัมมันตกภาพรังสีที่ได้รับจากภายนอกส่วนใหญ่จะเป็นรังสีแกมมา ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ที่มาจากแหล่งกำเนิดธรรมชาติ ค่า H_{ex} คำนวณได้จากสมการ (7) (Beretka and Mathew, 1985) สมการนี้เป็นรูปแบบจำลองของการได้รับอันตรายจากรังสีจากภายนอก เมื่อใช้วัสดุจากธรรมชาติ เช่น หินทราย มาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน โดยรูปแบบจำลองนี้จะสมมติว่าบ้านที่ก่อสร้างมีผนังหนามาก โดยไม่มีหน้าต่างและประตู (Krieger, 1981)

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (7)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือ ค่ากัมมันตกภาพจำเพาะในหน่วย Bq/kg ของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ตามลำดับ เมื่อค่า $H_{ex} < 1.0$ แสดงว่า ความเสี่ยงอันตรายจากรังสีภายนอกอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยถ้า $H_{ex} = 1.0$ ผู้ได้รับสัมผัสรังสีภายนอกจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 1.5 mGy/y พอดี และถ้า $H_{ex} > 1.0$ ผู้อาศัยในบ้านเรือนดังกล่าวจะมีความเสี่ยงอันตรายจากการได้รับสัมผัสรังสีจากภายนอกสูงกว่าเกณฑ์ปกติ โดยใช้นี้เป็นเกณฑ์ว่าไม่ควรจะนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน

ค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายในร่างกาย (H_m) มาจากก๊าซกัมมันตรังสีเรดอน ทอรอนและผลผลิตจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ คำนวณได้จากสมการ (8)

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (8)$$

โดยที่ A_{Ra} , A_{Th} และ A_K คือค่ากัมมันตภาพจำเพาะในหน่วย Bq/kg ของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ตามลำดับ

7. ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปี

ปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปี (Annual effective dose) ที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือน (Outdoor) สามารถหาได้จากการแปลงอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ 0.7 Sv/G (UNSCEAR, 2000) ซึ่งใช้สำหรับประเมินการได้รับรังสีในผู้ใหญ่ โดยคิดว่าคนเราอาศัยอยู่ภายนอกอาคารบ้านเรือนคิดเป็น 20 % ของเวลาทั้งหมด คำนวณปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปีได้จากสมการ (9)

$$\begin{aligned} \text{Annual effective dose (mSv)} &= \text{absorbed dose rate (mGy/h)} \times 8,760 \text{ h} \\ &\times 0.2 \times 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

ปริมาณรังสีประสิทธิผลต่อปี ที่ได้รับจากภายในอาคารบ้านเรือน (Indoor) สามารถหาได้จากการแปลงอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ 0.7 Sv/G เช่นเดียวกับการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกอาคารบ้านเรือน โดยคิดว่าคนเราอาศัยอยู่ในอาคารบ้านเรือนคิดเป็น 80 % ของเวลาทั้งหมด คำนวณปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ได้รับต่อปีได้จากสมการ (10)

$$\begin{aligned} \text{Annual effective dose (mSv)} &= \text{absorbed dose rate (mGy/h)} \times 8,760 \text{ h} \\ &\times 0.8 \times 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

มนุษย์เราควรได้รับสัมผัสรังสีกัมมันตภาพรังสีหลังจากธรรมชาติให้น้อยที่สุด โดยต้องมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดปริมาณรังสีรายบุคคลสำหรับคนงานด้านรังสี คือ 100 mSv ในเวลา 5 ปี สำหรับบุคคลทั่วไป ค่าปริมาณรังสีขนาดเสี่ยง (committed dose) ที่ได้รับไม่ควรเกิน 0.1 mSv/y หรือเท่ากับ 1/10 ของเกณฑ์ปลอดภัย (1 mSv/y; ICRP, 1991)

8. สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean) หรือค่าเฉลี่ย (mean) หาได้จากการเอาผลรวมของข้อมูลทั้งหมดหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่ามัธย

ฐาน (Median) เป็นค่าที่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของข้อมูลทั้งหมด เมื่อเรียงค่าข้อมูลจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุด หรือจากมากที่สุดไปหาน้อยสุด เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่ามีจำนวนข้อมูลที่มากกว่าและน้อยกว่าค่านี้อยู่ร้อยละ 50 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; S.D.) ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error; SE) โดยที่ $SE = SD / \sqrt{N}$ เมื่อ N คือ จำนวนตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูลในงานวิจัยนี้ จะแสดงด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต $\pm 1.96 \times SE$ ซึ่งแสดงช่วงข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % รอบค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีการแจกแจงแบบคล้ายปกติ

ผลและการวิเคราะห์ผล

1. การกระจายของกัมมันตภาพจำเพาะ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างดิน

Table 1 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของตัวอย่างดิน ในพื้นที่ 8 อำเภอของ จ.นครศรีธรรมราช พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 อยู่ระหว่าง 8 – 203 (เฉลี่ย 96 ± 18), 12 – 236 (เฉลี่ย 88 ± 23) และ 21 – 1191 (เฉลี่ย 524 ± 127) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยแต่ละอำเภอ พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ต่ำสุดพบที่ อ.เมือง (เฉลี่ย 69 ± 43 Bq/kg) ค่าเฉลี่ยสูงสุดพบที่ อ.พิปูน (เฉลี่ย 146 ± 58 Bq/kg) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ทอเรียม-232 ต่ำสุด พบที่ อ.ถ้ำพรรณรา (เฉลี่ย 19 ± 27 Bq/kg) และสูงสุดที่ อ.พิปูน (เฉลี่ย 162 ± 77 Bq/kg) สำหรับกัมมันตภาพจำเพาะ โพแทสเซียม-40 ต่ำสุด พบที่ อ.ถ้ำพรรณรา (เฉลี่ย 34 ± 47 Bq/kg) และสูงสุดที่ อ.ลานสกา (เฉลี่ย 975 ± 308 Bq/kg) Figure 3 เป็นแผนที่ระดับสีแสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินแต่ละอำเภอใน จ.นครศรีธรรมราช และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพรังสีในดินจากทั่วโลก ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 เท่ากับ 35, 30 และ 400 Bq/kg ตามลำดับ (UNSCEAR, 2000) พบว่า ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสามในตัวอย่างดินเกือบทั้งหมดของ จ.นครศรีธรรมราช มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของดินจากทั่วโลก ยกเว้นค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ทอเรียม-232 ใน อ.ถ้ำพรรณรา (19 ± 27 Bq/kg) ที่มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยจากทั่วโลก และอำเภอที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ โพแทสเซียม-40 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของดินจากทั่วโลก คือ อ.ถ้ำพรรณรา (34 ± 47 Bq/kg) อ.พรหมคีรี (372 ± 290 Bq/kg) กิ่ง อ.ช้างกลาง (389 ± 219 Bq/kg) และ อ.เมือง (391 ± 96 Bq/kg)

เมื่อประเมินเป็นค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของตัวอย่างดิน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 61 – 572 (เฉลี่ย 261 ± 51) Bq/kg (Table 1) เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปกติ 370 Bq/kg (OECD,

1979) พบว่ามี 2 อำเภอที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ปกติ คือ อ.ลานสกา (373 ± 172 Bq/kg) และ อ.พิปูน (425 ± 165 Bq/kg) Figure 7 (a) แสดงกราฟแท่งแจกแจงค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่างดินที่ศึกษา

2. การกระจายของกัมมันตภาพจำเพาะ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างหิน

Table 2 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ของตัวอย่างหิน พบว่ามีค่าระหว่าง 11 – 113 (เฉลี่ย 46 ± 14), 3 – 113 (เฉลี่ย 47 ± 16) และ 18 – 1305 (เฉลี่ย 472 ± 187) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อคิดเทียบเป็นค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล มีค่าอยู่ในช่วง 0.9 – 9.2 (เฉลี่ย 3.7 ± 1.1) ppm, ค่าความเข้มข้นทอเรียมสมมูล มีค่าอยู่ในช่วง 0.7 – 27.8 (เฉลี่ย 11.6 ± 4.0) ppm และค่าความเข้มข้นโพแทสเซียม มีค่าอยู่ในช่วง 0.1 – 4.2 (เฉลี่ย 1.5 ± 0.6) % ตามลำดับ (Table 3) ค่าเฉลี่ยกัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.ถ้ำพรรณรา (เฉลี่ย 25 ± 8 Bq/kg) สูงสุด ที่ อ.ฉวาง (เฉลี่ย 68 ± 27 Bq/kg) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะทอเรียม-232 เฉลี่ยต่ำสุดที่ อ.ถ้ำพรรณรา (22 ± 22 Bq/kg) และสูงสุดที่ อ.ฉวาง (87 ± 25 Bq/kg) ส่วนค่ากัมมันตภาพจำเพาะ โพแทสเซียม-40 ต่ำสุด เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.ถ้ำพรรณรา (เฉลี่ย 96 ± 94 Bq/kg) และสูงสุดพบที่ อ.พรหมคีรี (เฉลี่ย 1180 ± 245 Bq/kg) Figure 4 เป็นแผนที่ระดับสีแสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของตัวอย่างหินในแต่ละอำเภอใน จ. นครศรีธรรมราช เมื่อเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างหินที่ศึกษา กับค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 เฉลี่ยทั่วโลกในหินชั้นเปลือกโลกที่มีค่าเท่ากับ 40, 40 และ 400 Bq/kg (EC, 1999) พบว่า หินในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 สูงกว่าค่าเฉลี่ยของหินจากทั่วโลกเล็กน้อย 1.15, 1.17 และ 1.18 เท่า ตามลำดับ เมื่อแยกพิจารณาตามชนิดของหิน ซึ่งประกอบด้วย หินแกรนิต หินทรายแป้ง และหินปูน ผลที่ได้แสดงอยู่ใน Table 5 โดยความเข้มข้นของยูเรเนียมสมมูลในหินแกรนิตในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.7 ± 2.0 ppm เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมสมมูลในหินแกรนิตทั่วไป ที่มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 4.8 ppm (Faure, 1986) พบว่า หินแกรนิตในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมสมมูลสูงกว่าค่าความเข้มข้นในหินแกรนิตทั่วไป 1.2 เท่า

Table 4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของตัวอย่างหิน ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 18 – 320 (เฉลี่ย 150 ± 45) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปกติ พบว่าทุก

อำเภอที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า เกณฑ์ปกติ กราฟแท่งการแจกแจงค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่าง หิน แสดงดัง Figure 7 (b)

3. การกระจายของกัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 ของ ตัวอย่างทรายก่อสร้าง

Table 6 แสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีของตัวอย่างทราย ก่อสร้าง พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โปแทสเซียม-40 อยู่ ระหว่าง 3 – 91 (เฉลี่ย 42 ± 5), 14 – 91 (เฉลี่ย 50 ± 5) และ 102 – 966 (เฉลี่ย 509 ± 57) Bq/kg ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ในระดับอำเภอ พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ กิ่ง อ.นบพิตำ (เฉลี่ย 31 ± 10 Bq/kg) ค่าเฉลี่ยสูงสุดพบที่ อ.พิปูน (เฉลี่ย 66 ± 9 Bq/kg) ค่ากัมมันต ภาพจำเพาะ ทอเรียม-232 เฉลี่ยต่ำสุดพบที่ อ.เมือง (เฉลี่ย 40 ± 11 Bq/kg) และเฉลี่ยสูงสุดที่ อ.ลาน สกา (เฉลี่ย 57 ± 11 Bq/kg) ส่วนอำเภอที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะ โปแทสเซียม-40 เฉลี่ยต่ำสุดคือที่ อ.เมือง (เฉลี่ย 379 ± 116 Bq/kg) และสูงสุดพบที่ อ.พิปูน (เฉลี่ย 702 ± 50 Bq/kg) Figure 5 เป็นแผน ที่ระดับสีแสดงค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างทรายก่อสร้างในแต่ละ อำเภอใน จ.นครศรีธรรมราช

Table 7 แสดงผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียมของทรายก่อสร้าง ซึ่ง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 66 – 255 (เฉลี่ย 153 ± 10) Bq/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปกติ (370 Bq/kg) พบว่าทุกอำเภอที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์ Figure 7 (c) แสดงกราฟแท่งการแจกแจงค่ากัมมันต ภาพสมมูลเรเดียมในตัวอย่างทรายก่อสร้าง

4. การกระจายค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226 ของตัวอย่างน้ำบ่อต้น

ผลการวิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ในตัวอย่างน้ำบ่อต้น ทั้งหมด 55 ตัวอย่าง แสดงใน Table 8 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2 – 179 (เฉลี่ย 17 ± 7) mBq/l เมื่อเทียบ กับเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อน เรเดียม-226 สูงสุดที่ยอมรับได้ (MCL, Maximum Contaminant Level) ของทบวงการพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US EPA, 1976) ได้ กำหนดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของเรเดียม-226 ในน้ำบริโภคว่าไม่ควรเกิน 111 mBq/l ซึ่งผลการ วิเคราะห์เรเดียม-226 ในน้ำบ่อต้นใน จ.นครศรีธรรมราช พบว่ามีน้ำบ่อต้นเพียง 1 ตัวอย่าง ใน อ. เมือง มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเท่ากับ 179 mBq/l ซึ่งเกิน MCL แสดงให้เห็นว่า น้ำบ่อต้นส่วนใหญ่ ในบริเวณที่ทำการศึกษามีความปลอดภัยทางรังสี ยกเว้นน้ำบ่อต้นที่พบใน อ.เมือง 1 ตัวอย่าง

5. การกระจายปริมาณรังสีที่ประชาชนได้รับจากดิน หิน ทรายนอกอาคาร

ผลจากการประเมินค่าปริมาณรังสีภายนอกอาคารบ้านเรือน (Outdoor) ที่ประชาชนจะได้รับจากตัวอย่างดิน มีค่าอยู่ในช่วง 30 – 254 (เฉลี่ย 119 ± 23) nGy/h เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณรังสีภายนอกอาคารบ้านเรือนที่ตรวจวัดในประเทศไทยซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77 nGy/h (UNSCEAR, 2000) พบว่ามี อ.ถ้ำพรรณราเพียงอำเภอเดียวที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 77 nGy/h (Table 1, Figure 6 (a))

ผลจากการประเมินค่าปริมาณรังสีภายนอกอาคารบ้านเรือนจากตัวอย่างหิน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 8 – 146 (เฉลี่ย 70 ± 21) nGy/h โดยมี 2 อำเภอที่มีค่าปริมาณรังสีเฉลี่ยสูงกว่า 77 nGy/h ได้แก่ อ.ฉวาง (117 ± 29 nGy/h) และ อ.พรหมคีรี (121 ± 18 nGy/h) ส่วนอำเภออื่นๆ มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 77 nGy/h (Table 4, Figure 6 (b))

การประเมินค่าปริมาณรังสีที่มาจากตัวอย่างทรายนอกอาคารจะคำนวณเป็นปริมาณรังสีที่ประชาชนได้รับจากการอาศัยอยู่ในอาคารบ้านเรือน (Indoor) ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับสัมผัสรังสีจากทรายนอกอาคาร ส่วนใหญ่จะมาจากการที่เราอาศัยอยู่ภายในบ้านที่ทำด้วยวัสดุก่อสร้างที่มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีปะปนอยู่ ผลจากการประเมินค่าปริมาณรังสีที่มาจากตัวอย่างทรายนอกอาคาร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 58 – 224 (เฉลี่ย 134 ± 9) nGy/h โดยค่าปริมาณรังสีในทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 48 nGy/h (Table 7, Figure 6 (c))

6. ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกและภายในร่างกาย

Table 4 แสดงผลการคำนวณดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอก (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) ของตัวอย่างหิน Figure 9 (a) แสดงกราฟแท่งของดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกและภายในร่างกาย โดยมีค่า H_{ex} อยู่ในช่วง 0.05 – 0.86 โดยไม่มีอำเภอใดที่มีค่าเฉลี่ย $H_{ex} > 1.0$ และเมื่อพิจารณาลงไปในระดับอำเภอก็ไม่พบว่ามีตัวอย่างใดที่มีค่า $H_{ex} > 1.0$ และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย H_{in} ของหิน พบว่า ทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 1.0 แต่เมื่อพิจารณาลงไปในระดับอำเภอ พบว่ามีตัวอย่างหิน 1 ตัวอย่างจาก อ.ฉวาง ที่มีค่า $H_{in} = 1.12$ กล่าวโดยสรุปหินในพื้นที่นี้มีความปลอดภัย และสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือนได้ ยกเว้น หินแกรนิตในพื้นที่ อ.ฉวาง ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

Table 7 แสดงผลการคำนวณดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกในร่างกาย (H_{ex}) และภายในร่างกาย (H_{in}) ของทรายนอกอาคาร Figure 9 (b) แสดงกราฟแท่งของดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกและภายในร่างกาย ซึ่งพบว่ามีค่า H_{ex} อยู่ในช่วง 0.18 – 0.69 โดยไม่มีอำเภอใดที่มีค่าเฉลี่ย $H_{ex} > 1.0$ และเมื่อพิจารณาลงไปในระดับอำเภอก็ไม่พบว่ามีตัวอย่างใดที่มีค่า

$H_{ex} > 1.0$ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายในร่างกาย (H_{in}) ที่เกี่ยวข้องกับแก๊ส เรดอน ทอโรน และผลผลิตที่สลายตัวให้รังสีแอลฟาของเรดอน ทอโรน พบว่า ทราศก่อสร้างทุก ตัวอย่างมีค่า $H_{in} < 1.0$ กล่าวคือ ทราศก่อสร้างในพื้นที่ที่มีความปลอดภัย และสามารถนำไปใช้เป็น วัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือนได้

7. กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่นครศรีธรรมราช กับพื้นที่ อ.นาหม่อม จ.สงขลา

ผลการเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232, โพแทสเซียม-40 และค่า Ra_{eq} ของทราศก่อสร้างในพื้นที่ อ.นาหม่อม จ.สงขลา (แพร, 2547) ซึ่งมีค่า อยู่ในช่วง 34 – 90 (เฉลี่ย 56 ± 17) Bq/kg, 19 – 124 (เฉลี่ย 47 ± 27) Bq/kg, 377 – 1421 (เฉลี่ย 1048 ± 355) Bq/kg และ 106 – 330 (เฉลี่ย 204 ± 68) Bq/kg ตามลำดับ กับทราศก่อสร้างในพื้นที่ จ. นครศรีธรรมราช ที่มีค่าอยู่ในช่วง 3 – 91 (เฉลี่ย 42 ± 5), 14 – 91 (เฉลี่ย 50 ± 5) และ 102 – 966 (เฉลี่ย 509 ± 57) และ 66 – 255 (เฉลี่ย 153 ± 10) Bq/kg ตามลำดับ พบว่า ทราศก่อสร้างในพื้นที่ อ. นาหม่อม มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 และ ทอเรียม-232 อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับใน พื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช โดยทราศก่อสร้างในพื้นที่ อ.นาหม่อมมีค่าเฉลี่ยของ เรเดียม-226 มากกว่า ในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช 1.3 เท่า แต่ค่าเฉลี่ยของ Th-232 ต่ำกว่าในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ โพแทสเซียม-40 ในทราศก่อสร้างในพื้นที่ อ.นาหม่อม มีการกระจายใน ช่วงกว้างกว่าในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช และมีค่าเฉลี่ยมากกว่าถึง 2 เท่า ส่วนค่ากัมมันตภาพสมมูล เรเดียมของทราศก่อสร้างในพื้นที่นาหม่อม มีการกระจายอยู่ในช่วงกว้างกว่า และมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า ในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช 1.3 เท่า

8. การประเมินปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปี

เมื่อคำนวณปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปีที่มาจกตัวอย่างดิน (Table 1) พบว่ามีค่า 0.04 – 0.31 mSv (เฉลี่ย 0.15 ± 0.03 mSv) เมื่อเปรียบเทียบเกณฑ์ปริมาณรังสี ขนาดเสี่ยงที่บุคคลทั่วไปได้รับ ไม่ควรเกิน 0.1 mSv พบว่า เกือบทุกอำเภอที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 0.1 mSv ยกเว้น อ.ถ้าพรธรรมาเพียงอำเภอเดียวที่ได้รับรังสีไม่เกิน 0.1 mSv

ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปี ที่มาจกตัวอย่างหิน (Table 4) พบว่า มีค่า 0.01 – 0.18 mSv (เฉลี่ย 0.09 ± 0.03) โดยมี 2 อำเภอที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 0.1 mSv ได้แก่ อ.พรหม คีรี และ อ.ฉวาง

ปริมาณรังสีประสิทธิผลที่ร่างกายได้รับต่อปี ที่มาจกทราศก่อสร้าง (Table 7) พบว่ามีค่า 0.29 – 1.10 mSv (เฉลี่ย 0.66 ± 0.04 mSv) โดยทุกอำเภอมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 0.1 mSv

9. การประเมินปริมาณเรเดียม-226 ที่ร่างกายได้รับต่อปี

เมื่อประเมินปริมาณเรเดียม-226 ที่ร่างกายได้รับต่อปีจากการบริโภคน้ำของประชาชนในพื้นที่ 6 อำเภอ 2 กิ่งอำเภอ ของจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้เกณฑ์ตาม WHO (2002) ซึ่งประเมินการบริโภคน้ำไว้ที่ 2 ลิตรต่อวัน หรือ 730 ลิตร/ปี เมื่อใช้ค่าปัจจัย 2.8×10^{-7} Sv/Bq เป็นปัจจัยสำหรับการประเมินปริมาณรังสีสมมูลที่ร่างกายได้รับต่อปีในผู้ใหญ่ (Adult Annual Equivalent Dose) ซึ่งผลการคำนวณปริมาณเรเดียม-226 ที่ร่างกายได้รับจากการบริโภคน้ำบ่อตื้นแสดงใน Table 8 นอกจากนี้ UNSCEAR (2000) ยังได้กำหนดปริมาณรังสีที่ได้รับจากเรเดียม-226 ต่ออายุ-น้ำหนักว่าไม่ควรเกิน 8 μ Sv ต่อปี

ผลการวิจัยพบว่า มีตัวอย่างน้ำบ่อตื้นจาก 4 บ่อ จากทั้งหมด 55 บ่อ ที่มีปริมาณรังสีเกิน 8 μ Sv ต่อปี ได้แก่ ตัวอย่างที่พบใน กิ่ง อ.ช้างกลาง อ.เมือง อ.ฉวาง และ กิ่ง อ.นบพิตำ ซึ่งมีปริมาณรังสีเรเดียม-226 ที่ได้รับต่อปี มีค่า 9, 37, 10 และ 12 μ Sv ตามลำดับ ซึ่งอาจทำให้ประชาชนที่บริโภคน้ำบ่อดังกล่าวจะมีความเสี่ยงที่จะได้รับปริมาณรังสีจากเรเดียม-226 สูงกว่าเกณฑ์ปกติ โดยเฉพาะตัวอย่างน้ำบ่อตื้นจาก อ.เมือง จะมีปริมาณเรเดียม-226 ปะปนอยู่สูงมากที่สุด Figure 8 แสดงกราฟแจกแจงปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีจากเรเดียม-226 จากการบริโภคน้ำบ่อตื้น

10. การกระจายของนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีของตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง และความสัมพันธ์กับธรณีวิทยาในพื้นที่

ผลจากการวัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างดิน หิน และทรายก่อสร้าง ในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช พบว่า พื้นที่ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีสูง สอดคล้องกันทั้งในตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง ได้แก่ อ.พิปูน อ.ลานสกา อ.ฉวาง อ.พรหมคีรี และ กิ่ง อ.นบพิตำ ซึ่งพื้นที่โดยส่วนใหญ่ในอำเภอดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิต ส่วนอำเภอที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีต่ำ คือ อ.ถ้าพระนรา โดยเฉพาะค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ โพแทสเซียม-40 เนื่องจากพื้นที่นี้มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินปูน ซึ่งหินชนิดนี้มีส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนเนต (CO_3) จึงทำให้มีนิ่วโคเลคัสต์กัมมันตรังสีในปริมาณต่ำ

สรุป

การวิจัยเพื่อตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่ อ.เมือง อ.ฉวาง กิ่ง อ.ช้างกลาง อ.ลานสกา อ.ถ้าพระนรา อ.พิปูน อ.พรหมคีรี และ กิ่งอ.นบพิตำ ในตัวอย่างดิน หิน ทรายก่อสร้าง และน้ำบ่อตื้น โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ผลที่ได้ คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ในตัวอย่าง

ดิน มีค่าอยู่ระหว่าง 8 – 203 (เฉลี่ย 96 ± 18) Bq/kg, 12 – 236 (เฉลี่ย 88 ± 23) Bq/kg และ 21 – 1191 (เฉลี่ย 524 ± 127) Bq/kg ตามลำดับ หรือค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลมีค่าอยู่ในช่วง 0.7 – 16.4 (เฉลี่ย 7.7 ± 1.5) ppm ค่าความเข้มข้นของทอเรียมสมมูล มีค่าอยู่ในช่วง 3.1 – 58.2 (เฉลี่ย 21.6 ± 5.7) ppm และค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียม (K) มีค่าอยู่ในช่วง 0.1 – 3.8 (เฉลี่ย 1.7 ± 0.4) % ตามลำดับ โดยมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226 ของตัวอย่างดินในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช มีค่าสอดคล้องกับข้อมูลค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมสมมูลจากรายงานการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณี กล่าวคือ มีค่าสูงกว่า 4 ppm และมีค่าความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลสูงกว่าค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูลที่ผิวดินทั่วประเทศไทยที่มีค่าเท่ากับ 2.1 ppm ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสรังสี และเมื่อเปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ในตัวอย่างดินในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช กับพื้นที่ศึกษาในภูมิภาคอื่นของโลก พบว่า ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ของพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราชมีค่าสูงกว่าที่ตรวจพบในหลายๆ ประเทศ (Table 9) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของทอเรียม-232 มีค่าใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดในประเทศมาเลเซีย ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ โพแทสเซียม-40 มีค่าใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดในฮ่องกง ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 ในตัวอย่างหินมีค่าอยู่ระหว่าง 11 – 113 (เฉลี่ย 46 ± 14), 3 – 113 (เฉลี่ย 47 ± 16) และ 18 – 1305 (เฉลี่ย 472 ± 187) Bq/kg ตามลำดับ หรือเทียบเป็นความเข้มข้นยูเรเนียมสมมูล อยู่ในช่วง 0.9 – 9.2 (เฉลี่ย 3.7 ± 1.1) ppm, ค่าความเข้มข้นของทอเรียมสมมูล อยู่ในช่วง 0.7 – 27.8 (เฉลี่ย 11.6 ± 4.0) ppm และค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.1 – 4.2 (เฉลี่ย 1.5 ± 0.6) % ตามลำดับ ส่วนในตัวอย่างทรายก่อสร้างมีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226, ทอเรียม-232 และ โพแทสเซียม-40 อยู่ระหว่าง 3 – 91 (เฉลี่ย 42 ± 5), 14 – 91 (เฉลี่ย 50 ± 5) และ 102 – 966 (เฉลี่ย 509 ± 57) Bq/kg ตามลำดับ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 ในน้ำบ่อต้น มีค่าอยู่ระหว่าง 2 – 179 (เฉลี่ย 17 ± 7) mBq/l โดยมีตัวอย่างน้ำบ่อต้น 1 ตัวอย่าง จาก อ.เมือง ที่มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ เรเดียม-226 เท่ากับ 179 mBq/l ซึ่งเกินค่า MCL (111 mBq/l)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือที่จำเป็นในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถานวิจัยสารสนเทศภูมิศาสตร์ฯ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุญาตให้ยืมแผนที่สำหรับการออกเก็บตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

- จเร วุฒิสาศน์, 2548. ความเข้มข้นเรเดียม-226 ในน้ำบริโภค (น้ำบ่อตื้น) ในอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- แพร นิรนาทรังสรรค์, 2547. กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ Ra-226, Th-232 และ K-40 ในทรายจากบ่อทรายใน อ.หาดใหญ่และ อ.นาหม่อม จ.สงขลา, โครงการงานฟิสิกส์. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล, 2537. การวัดปริมาณยูเรเนียม (U-238) ในหินชนิดต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดสงขลา พัทลุง ปัตตานี. โครงการงานฟิสิกส์. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุภัทร ภัทรกิจโสภณ, 2547. ประสิทธิภาพการจับเรเดียมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแคตไอออน. โครงการงานฟิสิกส์. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Beretka, J. and Mathew P.J. 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product. Health Physics., 48:87-95.
- Chiozzi, P., De Felice, P., Fazio, A., Pasquale, V. and Verdoya, M. 2000. Laboratory application of NaI(Tl) γ -ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics. Journal of Applied Radiation and Isotopes., 53:127-132.
- Curie, L.A. 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Analyst Chem., 40:586-593.
- DMR, 1989. Airborne Radiometric Map : Uranium Equivalent Concentration, Economic and Information Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- EC. 1999. European Commission Report on Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Radiation protections 112.
- Faure, G. 1986. Principle of isotope geology (Second Edition). Singapore : John Wiley & Sons.
- IAEA. 1987. Preparation and Certification of IAEA Gamma Spectrometry Reference Materials RGU-1, RG-Th-1 and RGK-1, IAEA/RL/148, IAEA, Vienna, Austria, 48 p.
- ICRP 60. 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford.
- Ishihara, S., Sawata, H., Shibata, K., Terashima, S., Arrykul, S. and Sato, K. 1980. Granites and Sn-W deposits of peninsular Thailand. In: Mining Geol. Spec. Issue, 8.

- Kocher, D.C. and Sjoreen, A.L. 1985. Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. *Health Physics.*, 48:193-205.
- Krieger, R. 1981. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertigteil technik.*, 47:468-473.
- Malanca, A., Gaidolfi, L., Pessina, V. and Dallara, G. 1996. Distribution of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in soils of Rio Grande do Norte (Brazil). *Journal of Environmental Radioactivity.*, 30:55-67.
- Organization for Economic Cooperation and Development. 1979. Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency. OECD, Paris, France.
- Quindos, L.S., Fernandez, P.I., Soto, J., Rodenas, C. and Gomez, J. 1994. Natural radioactivity in Spanish soils. *Health Physics.*, 66:194-200.
- Rybach, L. 1988. Determination of the heat production rate. In: Haenel, R., Rubach, L., Stegena, L. (Eds.), *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 125-142.
- Singh, S., Rani, A. and Mahajan, R. 2005. ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Panjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. *Journal of Radiation Measurements.*, 39:431-439.
- UNSCEAR 1988. The United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation, sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York.
- UNSCEAR 2000. The United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation, sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York.
- US. Environmental Protection Agency. 1976. Interim primary drinking water regulations. Washington, DC, EPA.570/9-76-003.
- WHO (World Health Organization) 2002. Guidelines for drinking water quality, third edition :radiological aspects.

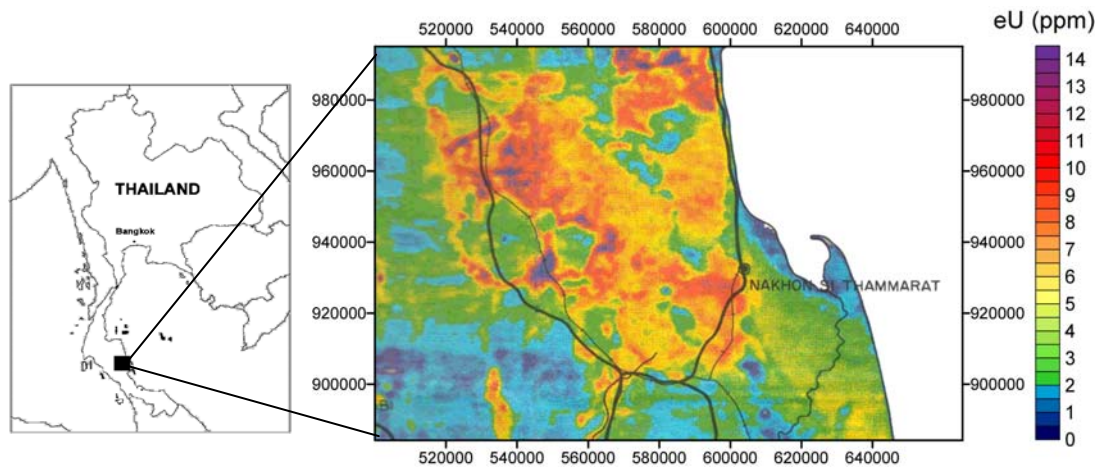


Figure 1 Map showing the concentration of uranium at surface soil in Nakhon Si Thammarat Province. (Modified from DMR, 1989)

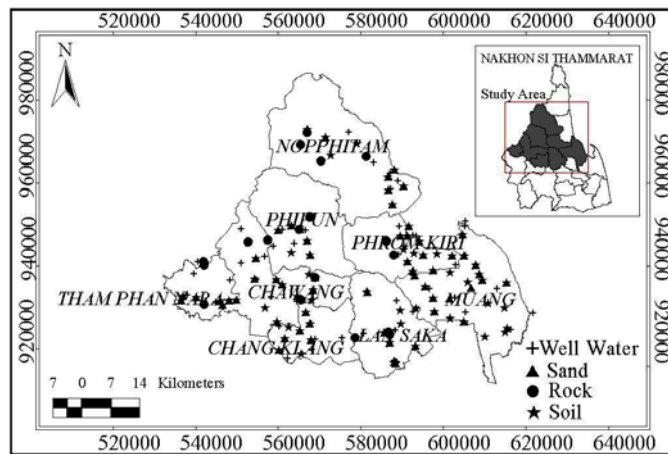


Figure 2 Map of Nakhon Si Thammarat Province showing sampling site.

Table 1 Average specific activity, Radium equivalent activity, Absorbed dose rate and Annual effective dose in soil samples

District/Sub-district (No. of sample)	Specific activity (Bq/kg)						Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K				
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Mean	Mean	Mean
Muang (5)	8 – 130	69 ± 43	43 – 100	53 ± 32	296 – 571	391 ± 96	174 ± 83	80 ± 37	0.10 ± 0.05
Chawang (3)	71 – 100	85 ± 16	136 – 170	154 ± 19	466 – 968	719 ± 284	361 ± 59	162 ± 28	0.20 ± 0.03
Chang Klang (3)	39 – 142	85 ± 59	25 – 128	77 ± 58	219 – 599	389 ± 219	225 ± 86	102 ± 37	0.13 ± 0.05
Lan Saka (3)	82 – 203	130 ± 73	75 – 178	118 ± 61	670 – 1191	975 ± 308	373 ± 172	172 ± 77	0.21 ± 0.09
Tham Phan Nara (3)	64 – 148	93 ± 54	12 – 46	19 ± 27	21 – 80	34 ± 47	123 ± 89	56 ± 40	0.07 ± 0.05
Phipun (3)	95 – 197	146 ± 58	102 – 236	162 ± 77	488 – 833	616 ± 214	425 ± 165	191 ± 72	0.23 ± 0.09
Phrom Kiri (3)	41 – 108	84 ± 41	21 – 94	47 ± 47	140 – 647	372 ± 290	179 ± 118	82 ± 54	0.10 ± 0.07
Nopphitam (3)	57 – 139	93 ± 48	54 – 115	94 ± 39	441 – 1111	788 ± 380	289 ± 18	133 ± 10	0.16 ± 0.01
Over all (26)	8 – 203 (90)	96 ± 18	12 – 236 (86)	88 ± 23	21 – 1191 (477)	524 ± 127	261 ± 51 (275)	119 ± 23 (124)	0.15 ± 0.03 (0.15)

Values in parentheses represent the median. The uncertainty of the mean values is represented by 95 % confidence limits for mean.

The uncertainty of the mean values is represented by 95 % confidence limits for mean.

Table 2 Average specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in rock samples

District/Sub-district (No. of sample)	Specific activity (Bq/kg)					
	^{226}Ra		^{232}Th		^{40}K	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Chawang (3)	52 – 95	68 ± 27	74 – 113	87 ± 25	695 – 869	794 ± 101
Lan Saka (3)	25 – 62	41 ± 21	8 – 80	36 ± 43	18 – 691	271 ± 414
Tham Phan Nara (3)	18 – 31	25 ± 8	31 – 35	22 ± 22	137 – 151	96 ± 94
Phipun (3)	27 – 78	45 ± 33	25 – 82	50 ± 33	162 – 821	405 ± 410
Phrom Kiri (2)	56 – 69	62 ± 13	53 – 90	72 ± 37	1055 – 1305	1180 ± 245
Nopphitam (4)	11 – 113	43 ± 50	3 – 84	30 ± 38	31 – 638	360 ± 302
Over all (18)	11 – 113 (43)	46 ± 14	3 – 113 (39)	47 ± 16	18 – 1305 (419)	472 ± 187

Table 3 Average concentration of eU, eTh and K in rock samples

District/Sub-district (No. of sample)	Concentration					
	eU (ppm)		eTh (ppm)		K (%)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Chawang (3)	4.2 – 7.7	5.5 ± 2.2	18.2 – 27.8	21.5 ± 6.2	2.2 – 2.8	2.6 ± 0.3
Lan Saka (3)	2.0 – 5.0	3.4 ± 1.7	2.0 – 19.6	8.9 ± 10.6	0.1 – 2.2	0.9 ± 1.3
Tham Phan Nara (3)	1.4 – 2.5	2.0 ± 0.6	7.6 – 8.7	5.4 ± 5.4	0.4 – 0.5	0.3 ± 0.3
Phipun (3)	2.2 – 6.3	3.6 ± 2.6	6.1 – 20.1	12.2 ± 8.1	0.5 – 2.7	1.3 ± 1.3
Phrom Kiri (2)	4.5 – 5.6	5.0 ± 1.0	13.0 – 22.3	17.6 ± 9.1	3.4 – 4.2	3.8 ± 0.8
Nopphitam (4)	0.9 – 9.2	3.5 ± 4.0	0.7 – 20.7	7.3 ± 9.4	0.1 – 2.1	1.2 ± 1.0
Over all (18)	0.9 – 9.2 (3.5)	3.7 ± 1.1	0.7 – 27.8 (9.6)	11.6 ± 4.0	0.1 – 4.2 (1.4)	1.5 ± 0.6

Table 4 Average Radium equivalent activity, Absorbed dose rate, Annual effective dose and Hazard index in rock samples

District/Sub-district (No. of sample)	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H _{ex}	H _{ex}
Chawang (3)	254 ± 65	117 ± 29	0.14 ± 0.04	0.69 ± 0.18	0.87 ± 0.25
Lan Saka (3)	114 ± 113	52 ± 52	0.06 ± 0.06	0.31 ± 0.30	0.42 ± 0.36
Tham Phan Nara (3)	63 ± 31	29 ± 14	0.04 ± 0.02	0.17 ± 0.08	0.24 ± 0.07
Phipun (3)	147 ± 110	68 ± 51	0.08 ± 0.06	0.40 ± 0.30	0.52 ± 0.38
Phrom Kiri (2)	255 ± 47	121 ± 18	0.15 ± 0.02	0.69 ± 0.13	0.86 ± 0.16
Nopphitam (4)	113 ± 90	53 ± 42	0.06 ± 0.05	0.31 ± 0.24	0.42 ± 0.35
Over all (18)	150 ± 45 (133)	70 ± 21 (63)	0.09 ± 0.03 (0.08)	0.41 ± 0.12 (0.36)	0.53 ± 0.15 (0.54)

Table 5 Average concentration of eU, eTh and K in rock samples

Type of rock (No. of sample)	Concentration					
	eU (ppm)		eTh (ppm)		K (%)	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
granite (6)	2.2 – 9.2	5.7 ± 2.0	10.5 – 27.8	15.5 ± 7.9	0.7 – 4.2	2.5 ± 1.0
siltstone (3)	4.2 – 6.3	5.0 ± 1.3	18.2 – 20.1	19.0 ± 1.1	2.2 – 2.8	2.6 ± 0.3
limestone (9)	0.9 – 3.9	2.0 ± 0.8	0.7 – 20.7	6.5 ± 4.0	0.1 – 2.1	0.5 ± 0.4

Table 6 Average specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in sand samples

District/Sub-district (No. of sample)	Specific activity (Bq/kg)					
	^{226}Ra		^{232}Th		^{40}K	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Muang (13)	3 – 60	36 ± 10	14 – 80	40 ± 11	102 – 742	379 ± 116
Chawang (9)	25 – 56	40 ± 7	16 – 83	55 ± 14	440 – 716	620 ± 57
Chang Klang (6)	10 – 73	45 ± 21	26 – 91	53 ± 18	486 – 691	609 ± 61
Lan Saka (7)	22 – 91	46 ± 19	35 – 77	57 ± 11	182 – 966	582 ± 188
Tham Phan Nara (6)	44 – 56	49 ± 4	33 – 61	44 ± 9	113 – 679	430 ± 182
Phipun (5)	56 – 78	66 ± 9	25 – 83	54 ± 24	625 – 759	702 ± 50
Phrom Kiri (9)	17 – 61	35 ± 9	33 – 78	50 ± 10	106 – 916	390 ± 227
Nopphitam (7)	20 – 60	31 ± 10	45 – 72	56 ± 7	250 – 749	531 ± 129
Over all (62)	3 – 91 (40)	42 ± 5	14 – 91 (49)	50 ± 5	102 – 966 (581)	509 ± 57

Table 7 Average Radium equivalent activity, Absorbed dose rate, Annual effective dose and Hazard index Indices in sand samples

District/Sub-district (No. of sample)	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	Annual effective dose (mSv)	H _{ex}	H _{in}
	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean
Muang (13)	122 ± 19	107 ± 17	0.53 ± 0.08	0.33 ± 0.05	0.43 ± 0.06
Chawang (9)	167 ± 21	147 ± 17	0.72 ± 0.09	0.45 ± 0.06	0.56 ± 0.06
Chang Klang (6)	167 ± 23	148 ± 19	0.73 ± 0.09	0.45 ± 0.06	0.57 ± 0.09
Lan Saka (7)	172 ± 27	151 ± 25	0.74 ± 0.12	0.46 ± 0.07	0.59 ± 0.10
Tham Phan Nara (6)	145 ± 24	128 ± 7	0.63 ± 0.03	0.39 ± 0.07	0.52 ± 0.07
Phipun (5)	197 ± 40	176 ± 32	0.87 ± 0.16	0.53 ± 0.11	0.71 ± 0.12
Phrom Kiri (9)	137 ± 28	119 ± 26	0.58 ± 0.13	0.37 ± 0.08	0.47 ± 0.08
Nopphitam (7)	152 ± 9	133 ± 7	0.65 ± 0.03	0.41 ± 0.02	0.50 ± 0.04
Over all (62)	153 ± 10 (150)	134 ± 9 (135)	0.66 ± 0.04 (0.66)	0.41 ± 0.03 (0.41)	0.52 ± 0.03 (0.52)

Table 8 Average specific activity of Radium-226 in shallow well water and annual effective dose

District/Sub-district (No. of sample)	Range (mBq/l)	Mean \pm 1.96 SE (mBq/l)	Mean Annual effective dose (μ Sv)
Muang (11)	5 – 179	31 \pm 30	6 \pm 6
Chawang (6)	5 – 29	12 \pm 9	3 \pm 2
Chang Klang (6)	4 – 28	15 \pm 8	3 \pm 2
Lan Saka (8)	10 – 45	11 \pm 11	2 \pm 2
Tham Phan Nara (7)	2 – 50	23 \pm 14	5 \pm 3
Phipun (4)	21 – 36	21 \pm 15	4 \pm 3
Phrom Kiri (6)	2 – 16	4 \pm 5	1 \pm 1
Nopphitam (7)	2 – 59	13 \pm 16	3 \pm 3
Over all 8 districts (55)	2 – 179 (10)	17 \pm 7	4 \pm 1(2)

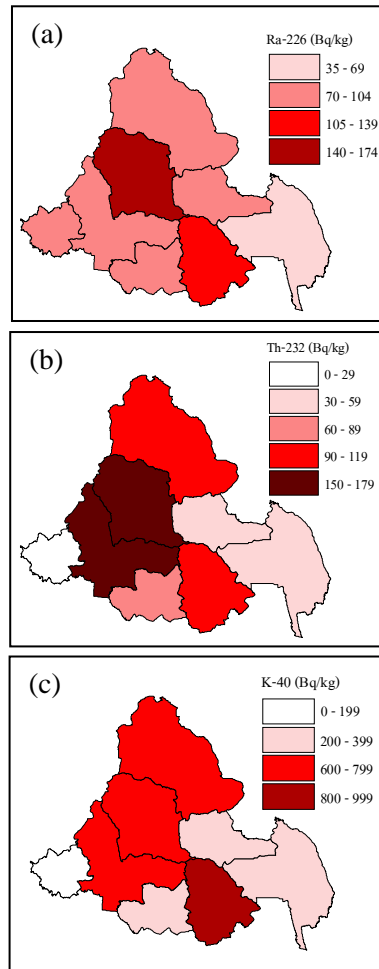


Figure 3 Specific activity map of (a) Ra-226, (b) Th-232 and (c) K-40 in soil samples.

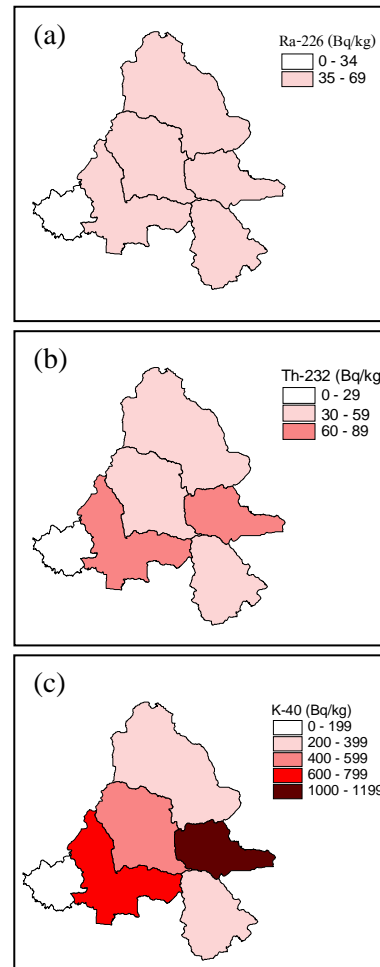


Figure 4 Specific activity map of (a) Ra-226, (b) Th-232 and (c) K-40 in rock samples.

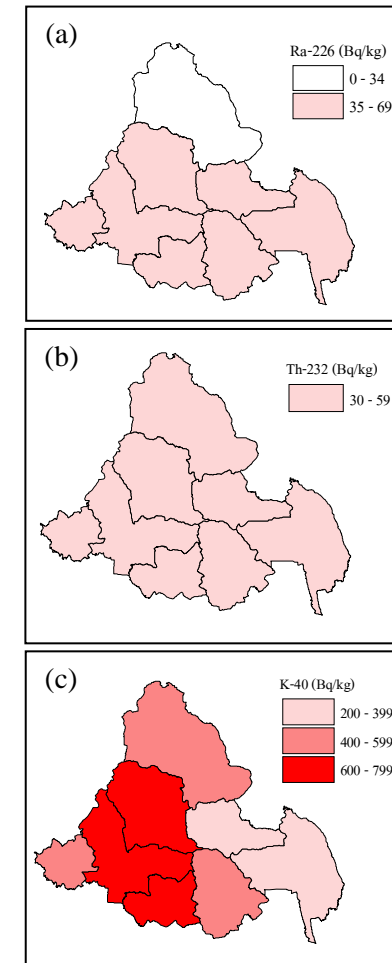
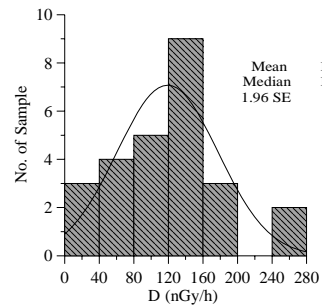
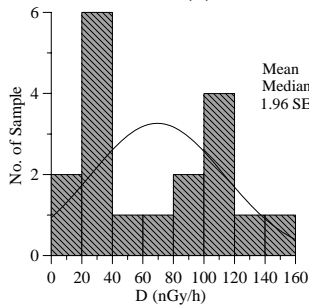


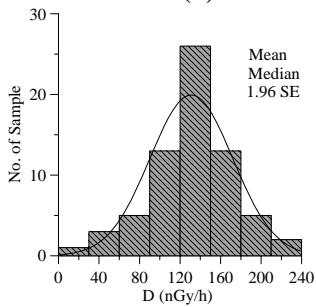
Figure 5 Specific activity map of (a) Ra-226, (b) Th-232 and (c) K-40 in sand samples.



(a)

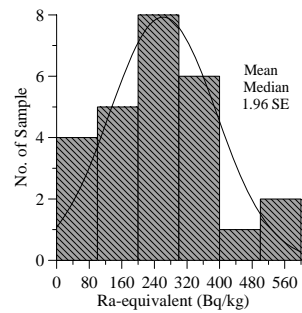


(b)

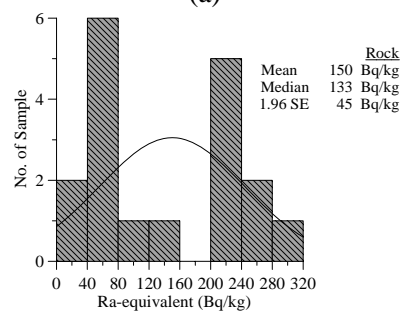


(c)

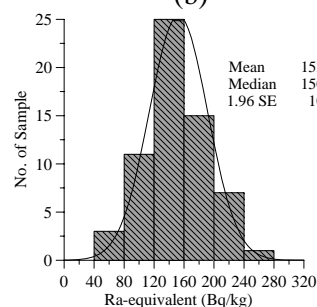
Figure 6 Histograms of absorbed dose rate in (a) soil, (b) rock and (c) sand samples.



(a)



(b)



(c)

Figure 7 Histograms of radium equivalent activity in (a) soil, (b) rock and (c) sand samples.

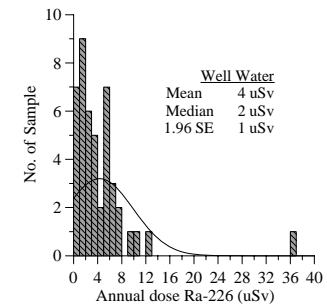
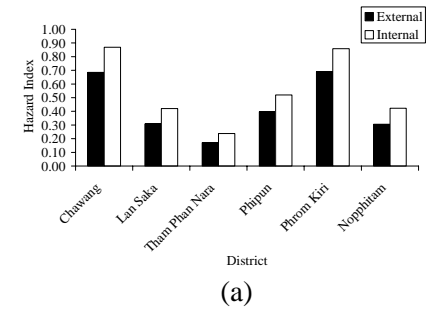
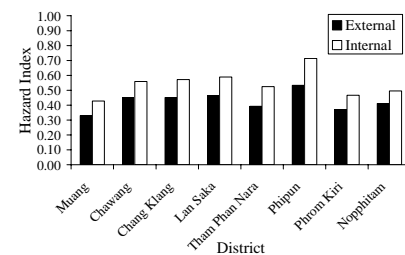


Figure 8 Histograms of annual effective dose (μSv) Ra-226 in Nakhon Si Thammarat Province.



(a)



(b)

Figure 9 Bar diagram showing the values of external and internal hazard index in (a) rock and (b) sand samples.

Table 9 Comparison of natural radioactivity level in soil and Absorbed dose rate in Nakhon Si Thammarat Province (Thailand) with those in other countries as given in UNSCEAR (2000)

Region/Country	Specific activity in soil (Bq/kg)						Absorbed dose rate	
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K		(nGy/h)	
	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Average	Range
Egypt ^a	17	5 – 64	18	2 – 96	320	29 – 690	32	20 – 133
United States ^a	40	8 – 160	35	4 – 130	370	100 – 700	47	14 – 118
China ^a	32	2 – 440	41	1 – 360	440	9 – 1800	62	2 – 340
Hong Kong ^a	59	20 – 110	95	16 – 200	530	80 – 1100	87	51 – 120
India ^a	29	7 – 81	64	14 – 160	400	38 – 760	56	20 – 1100
Japan ^a	33	6 – 98	28	2 – 88	310	15 – 990	53	21 – 77
Malaysia ^a	67	38 – 94	82	63 – 110	310	170 – 430	53	21 – 77
Iran ^a	28	8 – 55	22	5 – 42	640	250 – 980	71	36 – 130
Denmark ^a	17	9 – 29	19	8 – 30	460	240 – 610	52	35 – 70
Sweden ^a	42	12 – 170	42	19 – 94	780	560 – 1150	56	40 – 500
Switzerland ^a	40	10 – 900	25	4 – 70	370	40 – 1000	45	15 – 120
Poland ^a	26	5 – 120	21	4 – 77	410	110 – 970	45	18 – 97
Greece ^a	25	1 – 240	21	1 – 190	360	12 – 1570	56	30 – 109
Portugal ^a	44	8 – 65	51	22 – 100	840	220 – 1230	84	4 – 230
Median^a	35		30		400		57	
Present study ^b	96	8 – 203	88	12 – 236	524	21 – 1191	119	56 – 191

^aUNSCEAR (2000). ^bPresent study (Nakhon Si Thammarat Province, Thailand).