

กัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม -226 ในตัวอย่างน้ำบาดาล เขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด

Specific Activity of Radium-226 in Groundwater in the Area of Roi Et Province

ภูริต ควินรัมย์^{1*} และจเด็จ เย็นใจ²
Purit Quinram^{1*} and Chadet Yenchai²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม -226 จากตัวอย่างน้ำบาดาล จำนวน 20 ตัวอย่าง ในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ดโดยใช้เทคนิคการจับเรเดียมด้วยเส้นใยอะคริลิกที่เคลือบด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (Mn-Fiber) และวิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม -226 ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์พบว่าค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะเฉลี่ยของเรเดียม - 226 ในตัวอย่างน้ำบาดาล เขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ดอยู่ในช่วง <6 - 177 mBq/L และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปียังต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด

คำสำคัญ: เรเดียม -226 น้ำบาดาล แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ จังหวัดร้อยเอ็ด

Abstract

This work aimed to study specific activity of Radium-226 in groundwater in the area of Roi Et province. Totally, 20 groundwater samples were collected and examined. Radium in groundwater samples was absorbed by manganese fibers technique. In addition, specific activity of Radium-226 was analyzed using a low background HPGe Gamma ray spectrometer. Results showed that the specific activity of Radium -226 in groundwater samples are ranged from <6 - 177 mBq/L. The results showed that the annual dose equivalent obtained in the present study was much lower than the recommended reference dose level as reported by WHO.

Keywords: Radium-226, Groundwater, Gamma-Ray Spectrometer, Roi Et Province

บทนำ

ปัจจุบันนี้การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมเมือง ทำให้ผู้คนได้ก่อสร้างบ้านเรือนเป็นที่อยู่อาศัยจำนวนมากจึงใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น เช่น ดิน ไม้ ดิน น้ำ โดยเฉพาะน้ำซึ่งทุกครัวเรือนต้องใช้อุปโภคและบริโภค จากการสังเกตจะพบว่าบ้านเรือนตามชนบท หรือบ้านเรือนที่ห่างออกจากสังคมเมืองจะใช้น้ำซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำใต้ดิน (น้ำบาดาล) หรือนิยมเรียกว่าน้ำประปา-บาดาล ทำให้การตรวจสอบหรือการตรวจวัดระดับคุณภาพน้ำจากหน่วยงานที่รับผิดชอบเข้าไปไม่ทั่วถึง ซึ่งทำให้บางหมู่บ้านเสี่ยงต่อการบริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพได้ยกตัวอย่างเช่นเกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และกัมมันตภาพรังสี(radioactivity) เป็นต้น ถ้าแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนสารดังกล่าวนำมาผลิตเป็นน้ำดื่ม ก็เสี่ยงต่อการบริโภคน้ำที่มีอันตรายต่อสุขภาพได้ เพราะการขุดเจาะน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่จะมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงแตกต่างกันออกไปเพราะแต่ละพื้นที่

¹ อ., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด ร้อยเอ็ด 45120

² อ., ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

* Corresponding author: e-mail: quinram@hotmail.com Tel. 084-5859939

จะมีปัญหาแตกต่างกันตามคุณสมบัติทางเคมีของน้ำนั้น ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพได้ และประชาชนส่วนใหญ่ที่นำน้ำบาดาลมาบริโภค อุปโภคยังไม่ค่อยทราบว่าในน้ำนั้นมีกัมมันตภาพรังสีอยู่ หรือข้อมูลในเรื่องกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนในน้ำนั้นมีข้อมูลน้อยมาก

การที่น้ำมีกัมมันตภาพรังสีนั้นเนื่องมาจากในส่วนของประกอบของเปลือกโลก มีสารกัมมันตรังสี ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดโลกมากมาย ซึ่งมีปะปนอยู่ในปริมาณที่น้อย แต่ก็อยู่ในระดับที่จะสามารถตรวจวัดได้ วัสดุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่า NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) ซึ่ง NORM ในธรรมชาติที่สำคัญ คือ ยูเรเนียม-238 (U-238) มีค่าครึ่งชีวิต 4.47×10^9 ปี และทอเรียม-232 (Th-232) มีค่าครึ่งชีวิต 1.41×10^{10} ปี ซึ่งทั้ง 2 ไอโซโทปนี้ยังเป็นต้นกำเนิดไอโซโทปรังสีอื่นอีกเป็นจำนวนมาก โดยมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องจนไปสิ้นสุดที่ไอโซโทปเสถียร สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาตินี้มีแพร่กระจายอยู่ทั่วไปตามสภาพแวดล้อมของโลกและมักจะมียูเรเนียม-238 อยู่ในดิน หิน พืช น้ำและอากาศ เป็นต้น สำหรับไอโซโทปรังสีที่พบในน้ำธรรมชาติที่นับว่าเป็นอันตรายต่อมนุษย์มาก หากได้รับในปริมาณสูง คือ ธาตุเรเดียม-226 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวในอนุกรมยูเรเนียม-238 ธาตุเรเดียม-226 เป็นธาตุในหมู่ที่ 2 ตามตารางธาตุเช่นเดียวกับแคลเซียมซึ่งร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีความต้องการใช้ธาตุในหมู่นี้เพื่อการเสริมสร้างกระดูกและฟัน การที่เรเดียมมีความสามารถในการละลายน้ำได้ ดังนั้นจึงละลายปนอยู่ในน้ำและเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งจากการบริโภคน้ำโดยตรงผ่านทางวัฏจักรอาหาร ธาตุเรเดียม-226 เป็นธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งปลดปล่อย รังสีแอลฟาที่รังสีแกมมา และเมื่อร่างกายได้รับธาตุเรเดียม-226 เข้าไปในร่างกายแล้ว ธาตุเรเดียม-226 จะไปสะสมอยู่ตามกระดูกส่วนต่าง ๆ ในร่างกายแล้วถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางนั้นคือกระดูก เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเพิ่มโอกาสที่จะทำให้เป็นโรคมะเร็งกระดูกได้ [1-6]

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ และข้อมูลจากการศึกษาปริมาณเรเดียม-226 ในจังหวัดร้อยเอ็ดยังไม่มีมีการรายงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญที่จะทำงานวิจัยในครั้งนี้ โดยได้มุ่งสำรวจปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำบาดาลของแต่ละอำเภอในจังหวัดร้อยเอ็ดแบบสุ่ม และประเมินปริมาณรังสีซึ่งผลที่ร่างกายได้รับต่อปีในการบริโภคน้ำบาดาลในบริเวณพื้นที่ที่เก็บตัวอย่าง เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินความเสี่ยงในการได้รับรังสีจากธรรมชาติจากการบริโภคน้ำบาดาลที่มีเรเดียม-226 ปนเปื้อนในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด

วิธีการวิจัย

การเก็บและเตรียมตัวอย่าง

ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด จำนวน 20 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลระหว่างวันที่ 20 - 23 เดือนกันยายน พ.ศ.2555 ในแต่ละจุดจะใช้ GPS (global positioning system) เป็นเครื่องบันทึกตำแหน่ง นำน้ำตัวอย่างใส่ถังโพลีเอทิลีนปริมาตร 20 ลิตร แล้วปล่อยตัวอย่างน้ำบาดาลผ่านกระบอกพลาสติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุเส้นใยอะคริลิกที่เคลือบด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (Mn-Fiber) หนัก 10 กรัม โดยฉีกให้พู่จะมีความยาวของ Mn-Fiber ภายในกระบอกพลาสติกประมาณ 20 เซนติเมตร ควบคุมอัตราการไหลของน้ำตัวอย่าง 2 ลิตรต่อนาที ซึ่งเส้นใยอะคริลิกจะจับปริมาณ เรเดียม -226 ได้ดีในอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างในช่วงนี้ โดยจากการรายงานของภาวิณี วิสัยแสง ซึ่งทดลองกับน้ำ 100 ลิตร ในการเก็บตัวอย่างน้ำ [7] แล้วนำ Mn-Fiber ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ในถ้วยอลูมิเนียมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปฉีกใส่กล่องพลาสติกเก็บไว้ประมาณ 30 วัน เพื่อให้เข้าสู่สมดุลทางรังสีระหว่างนิวไคลด์ลูกของเรเดียม-226

การวัดและวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีจำเพาะ

หาปริมาณเรเดียม-226 ในตัวอย่างน้ำบาดาล ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ประกอบด้วยหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ขนาด 3 นิ้ว $\times$ 3 นิ้ว ของ Canberra รุ่น GC3021 ซึ่งมีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency) ที่พลังงาน 1.332 MeV ของโคบอลต์-60 (Co-60) อยู่ที่ 30 % และมีความสามารถในการจำแนกพลังงาน (energy resolution / FWHM) ที่พลังงาน 1.332 MeV ของโคบอลต์-60 อยู่ที่ 2.1 keV ซึ่งการปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสีจะใช้แหล่งกำเนิดสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน

โคบอลต์-60 และซีเซียม-137 และในการหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีจะใช้สารละลายมาตรฐานเรเดียม-226 ความแรงรังสี 444 dpm ต่อลิตร [7] เพื่อวิเคราะห์ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะเรเดียม-226 ในตัวอย่างน้ำบาดาล หัววัดรังสีจะอยู่ภายในถ้ำตะกั่วกำบังรังสี ทำให้รังสีจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่ในบริเวณนั้นไม่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปรบกวนระบบ วัดรังสีได้ ซึ่งในแต่ละตัวอย่างน้ำบาดาลจะทำการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 609.3 keV ของบิสมัท-214 (Bi-214) ซึ่งเป็นลูกหลานของ เรเดียม-226 แต่ละตัวอย่างใช้เวลาวัดรังสีแกมมา 43,200 วินาที โดยใช้โปรแกรม Genie-2000 ของ Canberra และเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (multichannel analyzer ; MCA)

ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี

หลังจากได้ค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม -226 ในตัวอย่างน้ำบาดาลของแต่ละพื้นที่ที่เก็บตัวอย่าง จึงได้ทำการคำนวณหาปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (annual effective dose) ของผู้ใหญ่ จากการดื่มน้ำเข้าไปในร่างกายที่มีการปนเปื้อนเรเดียม -226 โดยบริโภคน้ำดื่มในอัตรา 2 ลิตรต่อ 1 วัน และใช้ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์ของผู้ใหญ่ 0.28 $\mu\text{Sv/Bq}$ ตามสมการของ [4, 8]

$$\text{AED } (\mu\text{Sv/y}) = 365 \text{ (d/y)} \times 2 \text{ (L/d)} \times 0.28 \text{ } (\mu\text{Sv/Bq}) \times \text{Ra-226 (Bq/L)}$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาลจำนวน 20 ตัวอย่างในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด โดยทำการวัดรังสีแกมมาด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ พบว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 อยู่ในช่วง $<6 - 177 \text{ mBq/L}$ มีค่าสูงที่ตัวอย่าง RE 1 และ RE 15 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างอื่นให้ค่าที่แตกต่างกันส่วนใหญ่แนวโน้มจะต่ำ โดยอาจเกิดจากสภาพธรณีในพื้นที่ที่แตกต่างกัน แต่ตัวอย่างทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด คือไม่เกิน 1000 mBq/L [9] จึงปลอดภัยทางด้านรังสี ของปริมาณเรเดียม-226 ที่ละลายในน้ำสำหรับบริโภค ซึ่งข้อมูลจากการวิจัยในครั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของต่างประเทศและในประเทศไทยที่ได้เผยแพร่สู่สาธารณะ ได้แก่ประเทศตุรกี บราซิล อียิปต์ ออสเตรเลีย และ ประเทศไทยในจังหวัดสุราษฎร์ธานี เป็นต้น [1, 5, 8, 10-11] แสดงในตารางที่ 2

จากการคำนวณหาปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (annual effective dose) ของผู้ใหญ่จากการดื่มน้ำเข้าไปในร่างกายที่มีการปนเปื้อนเรเดียม-226 ในอัตรา 2 ลิตรต่อ 1 วัน พบว่ายังต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด ซึ่งไม่เกิน $100 \mu\text{Sv/y}$ แสดงในภาพที่ 2 และทำให้แน่ใจได้ว่าตัวอย่างน้ำบาดาลที่เก็บในจังหวัดร้อยเอ็ดในครั้งนี้ปลอดภัยจากทางด้านรังสีที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม ซึ่งบริโภคเข้าไป

ตารางที่ 1 พื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจำนวน 20 ตัวอย่าง และ ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม - 226

รหัส	พิกัดภูมิศาสตร์		อำเภอ	ความ เป็นกรด-ด่าง	ค่ากัมมันตภาพรังสี จำเพาะของเรเดียม - 226 (mBq/L)
	E	N			
RE1	1025850	1799133	โพนทอง	7.6	177 ± 12
RE2	1044708	1806097	หนองพอก	7.0	12 ± 3
RE3	1042002	1818929	เมยวดี	8.5	35 ± 5
RE4	1014935	1800845	โพธิ์ชัย	6.8	< 6
RE5	1006098	1793736	เชียงขวัญ	8.3	21 ± 3
RE6	1006096	1793738	เมือง	9.8	< 6
RE7	1006204	1755107	เมืองสรวง	7.2	11 ± 5
RE8	1014297	1733133	สุวรรณภูมิ	7.4	7 ± 3

ตารางที่ 1 พื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจำนวน 20 ตัวอย่าง และ ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม – 226 (ต่อ)

รหัส	พิกัดภูมิศาสตร์		อำเภอ	ความ เป็นกรด-ด่าง	ค่ากัมมันตภาพรังสี จำเพาะของเรเดียม - 226 (mBq/L)
	E	N			
RE9	1034869	1718371	โพนทราย	6.2	22 ± 3
RE10	1036343	1728072	หนองฮี	6.9	< 6
RE11	1042185	7136314	พนมไพร	7.1	< 6
RE12	983451	1777631	ศรีสมเด็จ	9.2	< 6
RE13	976541	1754466	จตุรพักตรพิมาน	7.4	11 ± 4
RE14	972240	1739504	ปทุมรัตน์	7.8	8 ± 3
RE15	986334	1741306	เกษตรวิสัย	6.5	118 ± 3
RE16	986327	1741333	ทุ่งเขาหลวง	9.0	< 6
RE17	1021985	1765874	อาจสามารถ	8.1	< 6
RE18	1008199	1779025	ธวัชบุรี	8.1	< 6
RE19	990603	1789826	จังหาร	7.8	< 6
RE20	1022255	1790436	เสลภูมิ	8.2	< 6

หมายเหตุ ค่า Limit of Detection ของระบบวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6 mBq/L

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม – 226 ในตัวอย่างน้ำบาดาล กับข้อมูลงานวิจัยของต่างประเทศและในประเทศ

แหล่งข้อมูล	ค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะเรเดียม – 226 (mBq / L)	อ้างอิง
องค์การอนามัยโลก	1000	[9]
ประเทศตุรกี	11 - 36	[10]
ประเทศบราซิล	< 2.2 - 235	[1]
ประเทศอียิปต์	0.5 - 22	[8]
ประเทศออสเตรเลีย	3.2 - 151.1	[11]
จังหวัดสุราษฎร์ธานี	< 4.18 – 138.2	[5]
จังหวัดร้อยเอ็ด	< 6 - 177	พื้นที่ศึกษา

ภาพที่ 2 ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีของผู้อยู่อาศัยในการบริโภคตัวอย่างน้ำบาดาลในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด

สรุปผลการวิจัย

ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีในการบริโภค ตัวอย่างน้ำบาดาลจำนวน 20 ตัวอย่างในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด อยู่ในค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด แนใจได้ว่าประชาชนที่ใช้น้ำจากแหล่งที่กล่าวมานี้ปลอดภัยจากการปนเปื้อนรังสีที่อยู่ในแหล่งน้ำจากกัมมันตรังสีเรเดียม-226 ข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในทางรังสีสิ่งแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ของจังหวัดร้อยเอ็ด และสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในระดับชาติ และนานาชาติได้

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2555 สถาบันวิจัยและพัฒนา และ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ดให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล อุปกรณ์และสารเคมีในการทำวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดปริมาณเรเดียม-226

เอกสารอ้างอิง

- [1] Oliveira, J., Mazzilli, B., Sampa, M. H. O. and Bambalas, E. (2001). Natural radionuclides in drinking water supplies of Sao Paulo State, Brazil and consequent population doses. **Journal of Environmental Radioactivity**. 53, 99-109.
- [2] Kannan, V., Rajan, M. P., Iyengar, M.A.R. and Ramesh, R. (2002). Distribution of natural and anthropogenic radionuclides in soil and beach sand samples of Kalpakkam (India) using hyperpure germanium (HpGe) gamma ray spectrometry. **Applied Radiation and Isotopes**. 57, 109-119.
- [3] Mireles, F., Davilla, J.I., Quirino, L.L., Lugo, J.F., Pinedo, J.L. and Rios, C. (2003). Natural soil gamma radioactivity levels and resultant population dose in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Zacatecas, Mexico. **Health Physics**. 84, 368-372.
- [4] Porntepkasemsan, B. and Srisuksawad, K. (2008). Assessment of ^{226}Ra age-dependent dose from water intake. **Applied Radiation and Isotopes**. 66, 1654-1656.
- [5] เจริญ ศรีสวัสดิ์ ชัยยุทธ นทีธร และอานนท์ ศรีสุข. (2553). ปริมาณความเข้มข้นเรเดียม-226 ในน้ำบ่อต้นและน้ำดื่มบรรจุขวดปิดสนิทในจังหวัดสุราษฎร์ธานี. **วารสารวิชาการสาธารณสุข**. 19(6), 921-929.
- [6] ชัยชนะ เจ๊ะสะอ๊ะ ไตรภพ ม่องสุวรรณ และธวัช ชิตตระการ. (2552). “ไอโซโทปกัมมันตรังสีเรเดียม-226 และการแพร่กระจายในบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนของจังหวัดสุราษฎร์ธานี”, ใน **การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 11**. วันที่ 2-3 กรกฎาคม 2552. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ.
- [7] ภาวินี วิสัยแสง. (2547). **การหาปริมาณเรเดียม-226 ในน้ำโดยใช้แมงกานีสไดออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยอะคริลิกเป็นตัวดูดซับ**. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] Abdellah, W.M. and Diab, H.M. (2012). Determination of Natural Radioactivity in Drinking Water and Consequent Dose to Public. **Nature and Science**. 10(1), 137-142.
- [9] World Health Organization. (2011). **Guidelines for Drinking-Water Quality** (fourth ed). Geneva: Switzerland.
- [10] Karahan, G., Ozturk, N. and Bayulken, A. (2000). Natural radioactivity in various surface waters in Istanbul, Turkey. **Water Research**. 34(18), 4367-4370.
- [11] Walsh, M., Wallner, G. and Jennings, P. (2014). Radioactivity in drinking water supplies in Western Australia. **Journal of Environmental Radioactivity**. 130, 56-62.