

Ispitivanje prisutnosti radona u građevinskom materijalu

Ivić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:715935>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

ISPITIVANJE PRISUTNOSTI RADONA U GRAĐEVINSKOM MATERIJALU

Diplomski rad

Iva Ivić

R4183

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/21
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 13.02.2023.

Iva Ivić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/21, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 09.02.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

Ispitivanje prisutnosti radona u građevinskom materijalu

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Želimir Veinović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditelja Izv.prof.dr.sc. Marko Cvetković.

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Marko Cvetković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom „Ispitivanje prisutnosti radona u građevinskom materijalu“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom, uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Želimira Veinovića i prof. dr. sc. Marka Cvetkovića.

Ovaj diplomski rad je izrađen u okviru projekta „RGN START – STručnA pRaksa za živoT“ (UP.03.1.1.04).

Uroš Lukić

ISPITIVANJE PRISUTNOSTI RADONA U GRAĐEVINSKOM MATERIJALU

Iva Ivić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom radu ispitana je prisutnost odnosno koncentracija radona i torona kao rezultat ekshalacije iz građevinskih materijala. Brojni građevinski materijali sadrže elemente u tragovima čijim radioaktivnim raspadom nastaju nove nestabilne jezgre tzv. kćerke. Krajnji produkt raspada radona su teški metali te energija ionizacije koji predstavljaju opasnost za živu tvar. Mjerenja su izvođena u laboratoriju za spektroskopiju na RGN fakultetu na 5 uzoraka različitih građevinskih materijala. Izmjerene vrijednosti ravnotežne koncentracije za uzorke granita i cementa nekoliko su puta veće od prosječne procijenjene vrijednosti koncentracije za građevinski materijal. Usporedba rezultata dobivenih tijekom ovog ispitivanja s rezultatima iz objedinjene baze mjerenja ekshalacije radona iz građevinskog materijala ukazuje na velike razlike u dobivenim vrijednostima. Prisutnost i povišene vrijednosti koncentracije radona u uzorcima građevinskog materijala izmjerene prilikom ovog ispitivanja potvrđuju potrebu za praćenjem vrijednosti radona u građevinskom materijalu iskazanu u drugim znanstvenim radovima na istu temu.

Ključne riječi: radon, građevinski materijal, toron

Diplomski rad sadrži: 49 stranice, 6 tablica, 16 slika, 5 priloga, i 20 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor, RGNF
Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor, RGNF
Dr. sc. Helena Vučenović, docentica, RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor, RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, izvanredni profesor, RGNF

TESTING THE PRESENCE OF RADON IN BUILDING MATERIALS

Iva Ivić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics, Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In this thesis, the presence and the concentration of radon and thoron as a result of exhalation from building materials was examined. Numerous building materials contain trace elements whose radioactive decay creates new unstable nuclei, the so-called daughters. The final products of radon decay are heavy metals and ionization energy, which pose a danger to living beings. The measurements were performed at the RGN Faculty in the spectroscopy laboratory on 5 samples of different building materials. The measured equilibrium concentration values for the granite and cement samples are several times higher than the average estimated concentration value for the construction material. A comparison of the results obtained during this test with the results from the unified database of measurements of radon exhalation from building materials indicates large differences in the obtained values. The presence and elevated values of radon concentration in construction material samples measured during this test confirm the need to monitor the radon value in construction material stated in other scientific works on the same topic.

Keywords: radon, construction material, thoron

Thesis contains: 49 pages, 6 tables, 16 figures, 5 appendixes, i 20 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Associate Professor Želimir Veinović, PhD
Associate Professor Marko Cvetković, PhD

Reviewers: Associate Professor Želimir Veinović, PhD
Associate Professor Marko Cvetković, PhD
Assistant Professor Helena Vučenović, PhD
Associate Professor Tomislav Korman, PhD
Associate Professor Dubravko Domitrović, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ZNAČAJKE RADONA I OSNOVE POJAVNOSTI RADONA	2
2.1. Izvori radona.....	2
2.2. Nastanak radona.....	2
2.3. Raspad radona.....	6
2.4. Utjecaj radona na zdravlje	6
3. MJERENJE RADONA	7
3.1. Aktivne metode mjerenja radona.....	7
3.1.1. Scintilacijske ćelije	7
3.1.2. Ionizacijska komora.....	8
3.1.3. Elektrostaticko prikupljanje produkata radioaktivnog raspada.....	9
3.2. Pasivne metode	9
3.2.1. Metoda upotrebe aktivnog ugljena.....	10
3.2.2. Elektretičke ionizacijske komore.....	11
3.2.3. Detektori na bazi urezanih tragova	12
4. RADON U GRAĐEVINSKOM MATERIJALU	14
4.1. Prethodna istraživanja.....	14
5. REGULATIVA	16
6. UREĐAJ ZA MJERENJE RADONA.....	17
6.1. Konstrukcija uređaja.....	17
6.2. Princip mjerenja.....	18
7. METODOLOGIJA MJERENJA I KORIŠTENI UZORCI.....	19
8. REZULTATI.....	21
8.1. Rezultati mjerenja torona.....	24
9. DISKUSIJA.....	27
ZAKLJUČAK.....	28
PRILOZI.....	32

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Uranij- 235 niz radioaktivnog raspada prilikom kojeg nastaje izotop Rn-219 (Nuclear Forensic Search Project, 2022).....	3
Slika 2-2 Torijev niz radioaktivnog raspada prilikom kojeg nastaje izotop Rn-220 (Nuclear Forensic Search Project, 2022).....	4
Slika 2-3 Uranij-238 niz radioaktivnog raspada prilikom kojeg nastaje izotop Rn-222 (Wikipedia, 2014).....	5
Slika 3-1 Shematski prikaz scintilacijske ćelije (Agrwal et al., 2022).....	7
Slika 3-2 Scintilacijska ćelija (The Instrument Manufacturing Division of Pylon Electronics Inc., 2017).....	8
Slika 3-3 Ionizacijska komora (Matsusada precision Inc., 2022).....	8
Slika 3-4 Shema uređaja za kontinuirano praćenje radona na principu elektrostatičkog prikupljanja produkata radioaktivnog raspada (Gaware et al., 2011).....	9
Slika 3-5 Prikaz zatvorenog spremnika sa zaštitom trakom na poklopcu (desno) i otvorenog spremnika s mrežicom za smještaj posteljice (lijevo) (Darwish Al-Azmi et al., 2012).....	11
Slika 3-6 Prikaz elektretičke ionizacijske komore za mjerenje radona (Rad Elec Inc., 2022).....	12
Slika 3-7 Prikaz tragova alfa čestica dobivenog procesom jetkanja (Kadhun et al., 2016).....	13
Slika 6-1 Mjerni uređaj RTM 2200 Soil Gas, (Sarad, 2007).....	17
Slika 7-1 Inertna posuda s uzorkom spojena na mjerni uređaj RTM2200.....	20
Slika 8-1 Prikaz prosječne stope masene ekshalacije radona različitih građevinskih materijala.....	23
Slika 8-2 Vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn222 u različitim uzorcima građevinskih materijala.....	23
Slika 8-8-3 Prikaz prosječne stope masene ekshalacije torona različitih građevinskih materijala.....	25
Slika 8-8-4 Vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn220 u različitim uzorcima građevinskih materijala.....	26

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Prikaz vrijednosti masene ekshalacije građevinskog materijala iz baze podataka (Nuccetelli et al., 2020)	14
Tablica 7-1 Uzorci korišteni u ispitivanju	19
Tablica 8-1 Vrijednosti volumne koncentracije radona pridobivene mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnomrazdoblju	21
Tablica 8-2 Rezultati masene ekshalacije radona dobiveni mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnomrazdoblju	22
Tablica 8-3 Vrijednosti volumne koncentracije torona pridobivene mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnomrazdoblju	24
Tablica 8-4 Rezultati masene ekshalacije torona dobivenih mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnom razdoblju	25

POPIS PRILOGA

Prilog 1 Rezultati mjerenja uzorka Bela gradbena mivka bijeli građevinski pijesak	
Prilog 2 Rezultati mjerenja uzorka porfiroblastičnog granita	
Prilog 3 Rezultati mjerenja uzorka Batapati granita	
Prilog 4 Rezultati mjerenja uzorka Cemix kvarcnog pijeska	
Prilog 5 Rezultati mjerenja uzorka Nexe cement	

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
λ	h^{-1}	konstanta raspada
E_m	$\text{Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$	koeficijent otpora
C	$\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$	integrirana koncentracija radona (ravnotežna koncentracija)
V_I	m^3	volumen komore uređaja i dovodne cijevi
V_0	m^3	volumen zraka u akumulacijskoj komori
V	m^3	volumen zraka
T	h	vrijeme mjerenja
M	kg	masa uzorka

1. UVOD

Negativan utjecaj radona na tkivo živih bića je već odavno poznat. Iako je najpoznatiji izvor radona podzemlje, u literaturi se svakodnevno pojavljuju pitanja vezana uz izvor radona iz građevinskog materijala. Svrha ovog rada je naglasiti kako unatoč postojanju brojnih inicijativa koje ukazuju na potrebu praćenja radona u građevinama, danas još uvijek ne postoji protokol za praćenje radona u građevinskom materijalu, kao ni propisanih graničnih vrijednosti koncentracije niti ekshalacije radona u građevinskom materijalu. Također, prikazan je pregled ustaljenih metoda uređaja za mjerenje radona. Važno je naglasiti kako se danas eksperimentalni rezultati koncentracije radona u građevinskom materijalu većinom pridobivaju metodom jetkanja, koja je jeftina, ali ne i uvijek najpouzdanija te direktno korelacijom s koncentracijom radija gdje također postoji mogućnost pogreške. Nerijetko se sve više koriste pouzdaniji uređaji koji spadaju u aktivne metode mjerenja i rade na principu alfa spektroskopije s većom osjetljivošću detektora. Cilj ovog rada je ispitivanje potencijalne veze između povišenih koncentracija radona u zatvorenim prostorijama i građevinskog materijala kao nositelja tvari čijim radioaktivnim raspadom nastaju radon i toron. Stoga je u ovom radu ispitana mogućnost uporabe upravo takvog uređaja Sarad RTM2200 u svrhu mjerenja koncentracije radona i torona odnosno izračuna stope masene ekshalacije radona i torona. Ishod ovog rada je pridobivanje podataka o koncentracijama radona i torona te stopama masene ekshalacije dobivenih kontinuiranim mjerenjem te naglašavanje manjkavosti legislativne podloge za usporedbu dobivenih rezultata.

2. ZNAČAJKE RADONA I OSNOVE POJAVNOSTI RADONA

Radon je kemijski element i radioaktivni plin koji spada u 18. grupu periodnog sustava. Radon je bezbojan plin, inertan i 7,5 puta teži od zraka, pa se stoga često zadržava u nižim dijelovima prostorije i zgrade (Britannica, 2021).

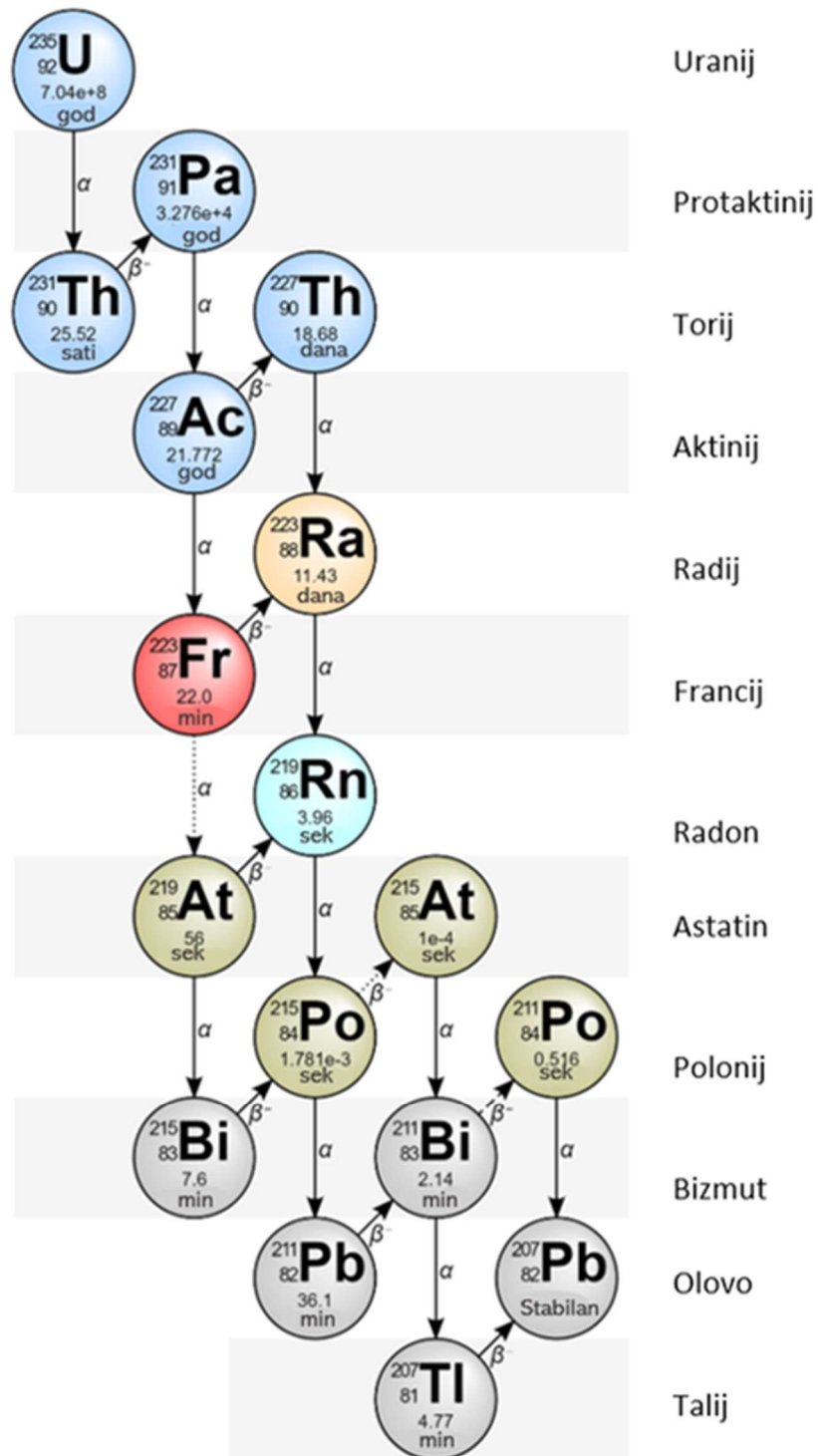
2.1. Izvori radona

"Radon je rijedak u prirodi obzirom da su svi njegovi izotopi kratkoživi i da je izvor radona-radij, rijedak element. U atmosferi se nalaze tragovi radona u prizemnom sloju, kao rezultat emanacije iz tla i stijena, koji sadrže manje količine radija nastalog radioaktivnim raspadom uranija. Osim u atmosferu radon također kroz tlo ulazi procesom difuzije u zgrade, najčešće kroz podrumne ili vodenim putem kroz vodonosnike, zbog topljivosti u vodi. Dakako, najveće razine radona u zgradama su prisutne u područjima gradnje iznad geoloških formacija koje sadrže značajnije količine uranijevih minerala." (Britannica, 2021.)

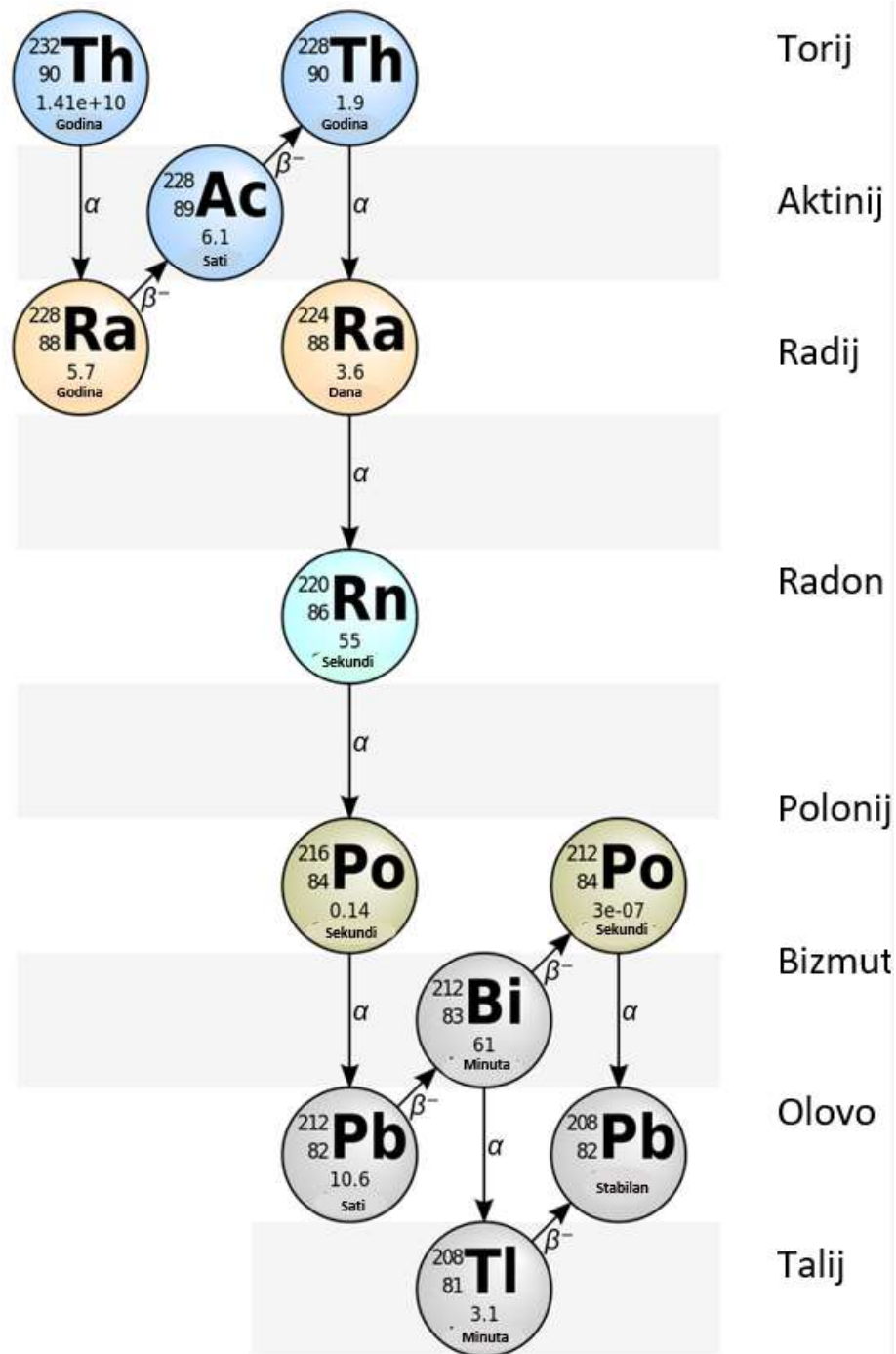
2.2. Nastanak radona

Prirodni radon čine 3 izotopa nastala radioaktivnim raspadima sljedećih nizova: U-235-radij (Slika 2-1), Th-232-torij (Slika 2-2) i U-238-aktinij (Slika 2-3). "Svi izotopi radona su radioaktivni. Izotop Rn-219 (s vremenom poluraspada $t_{1/2}=3,96$ s) nastaje raspadom aktinija pa se naziva aktinon. Izotop Rn-220 ($t_{1/2}=55,6$ s) nastaje raspadom torija pa se naziva toron, a najduže živi izotop Rn-222 ($t_{1/2} = 3,823$ dana) nastaje alfa-raspadom izotopa radija Ra-226 i naziva se radon" (Wikipedia, 2022). Sva tri niza sadrže jedan plinoviti izotop radona i krajnji stabilni izotop-olovo. Niz raspada radija počinje s U-238. Uranij i prvih pet kćerki¹ nastalih raspadom su krutine i zadržavaju se u tlu, dok se peta kćerka Ra-226 raspada u Rn-222 plinoviti produkt. Radon se ne veže kemijski u materijal kao i prethodni izotopi (majke) (Harvard, 2022).

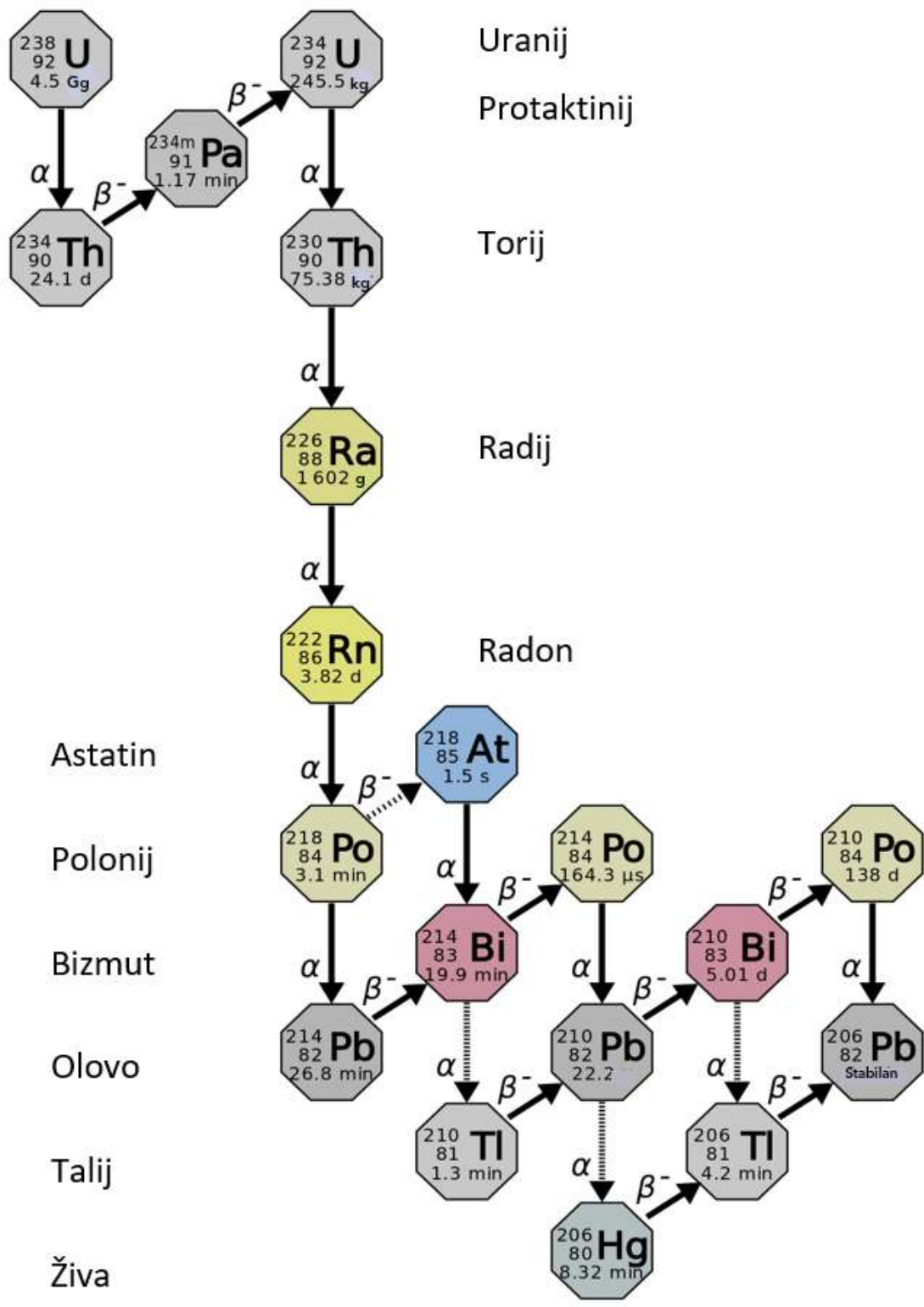
¹ Kćerke su nove jezgre nastale radioaktivnim raspadom nestabilnih jezgara



Slika 2-1 Uranij- 235 niz radioaktivnog raspada prilikom kojeg nastaje izotop Rn-219 (Nuclear Forensic Search Project, 2022)



Slika 2-2 Torijev niz radioaktivnog raspada prilikom kojeg nastaje izotop Rn-220 (Nuclear Forensic Search Project, 2022)



Slika 2-3 Uranij-238 niz radioaktivnog raspada prilikom kojeg nastaje izotop Rn-222 (Wikipedia, 2014)

2.3. Raspad radona

Svi izotopi radona se raspadaju u stabilne jezgre helija i izotope teških metala poput olova. (Britannica, 2021). Vrijeme poluraspada Rn-222 je dovoljno da plin izađe u atmosferu i veže se na čestice u zraku. Druga dva niza nisu toliko značajna u pogledu radioloških utjecaja obzirom na kratko vrijeme poluraspada Rn-219 i Rn-220, te rijetku pojavnost nuklida U-235 (Harvard, 2022).

2.4. Utjecaj radona na zdravlje

Sam po sebi radon nema značajan utjecaj na zdravlje, obzirom da je inertan plin, pa se ne zadržava se u velikim količinama u tijelu odnosno u dišnim putevima. Negativan utjecaj radona uzrokovan je njegovim raspadom u zraku u olovo, bizmut i polonij prilikom kojeg se emitiraju alfa čestice. Nastale kćeri spadaju u skupinu teških metala i u krutom su stanju, za razliku od radona, te se lako lijepe za čestice prisutne u zraku i pokućstvo. Na ovaj način se radioaktivne čestice unose u dišni sustav. U slučaju da se alfa čestica emitira unutar pluća, ona svu svoju energiju ionizacije prenosi u tanki sloj okolnog tkiva (Harvard, 2022).

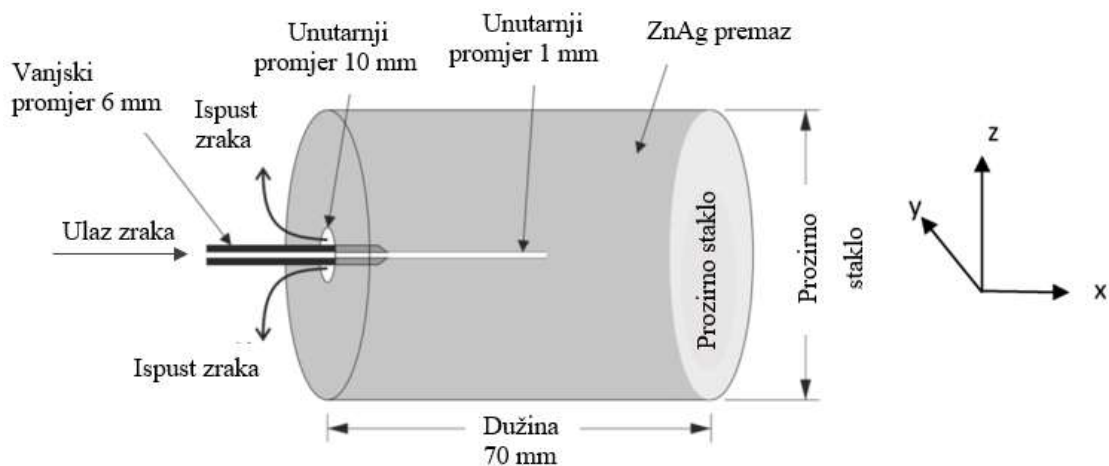
3. MJERENJE RADONA

3.1. Aktivne metode mjerenja radona

Instrumenti koji se baziraju na principu aktivne metode mjerenja imaju mogućnost brojanja alfa čestica emitiranih raspadom radona. Analiza se provodi na uzorcima radona u poznatom volumenu zraka dobivenog unošenjem istog u komoru. Ovakvi uređaji omogućuju jednostavan pristup preciznim podacima mjerenja i dugotrajnija (kontinuirana) mjerenja radona, ali njihov rad zahtjeva struju (Nuvap, 2020).

3.1.1. Scintilacijske ćelije

U ovoj metodi koristi se hermetički zatvoren metalni spremnik, koji se ili puni zrakom za uzorkovanje kroz jedan vakumski konektor ili se ispire sa zrakom zapremnine nekoliko volumena ćelije kroz dva vakumska konektora. Ćelija je cilindričnog oblika i zatvorena je na jednom kraju s prozirnim staklom. Nakon što se ćelija ispuni zrakom, stvoriti će se produkti raspada radona i nakon otprilike 3 sata kratkoživoći produkti u ćeliji nalaze se u sekularnoj ravnoteži (stanje u kojem su iznosi aktivnosti roditelja-radona i kćeri jednaki). Tada se emitiraju 3 alfa čestice unutar ćelije za svaki raspad radona, po jedna od radona-222, polonija-218 i polonija-214. Unutrašnja površina scintilatora je najčešće premazana slojem ZnS(Ag), koji u reakciji s alfa česticom oslobađaju svjetlosne impulse, a fotomultiplikatorska cijev i odgovarajuća elektronika bilježe te svjetlosne pojave. Kako bi se omogućilo kontinuirano uzorkovanje, zrak se može konstantno upumpavati u posudu ili se može difundirati kroz svjetlosno nepropusnu barijeru (Miles, 2004) (Slika 3-1).



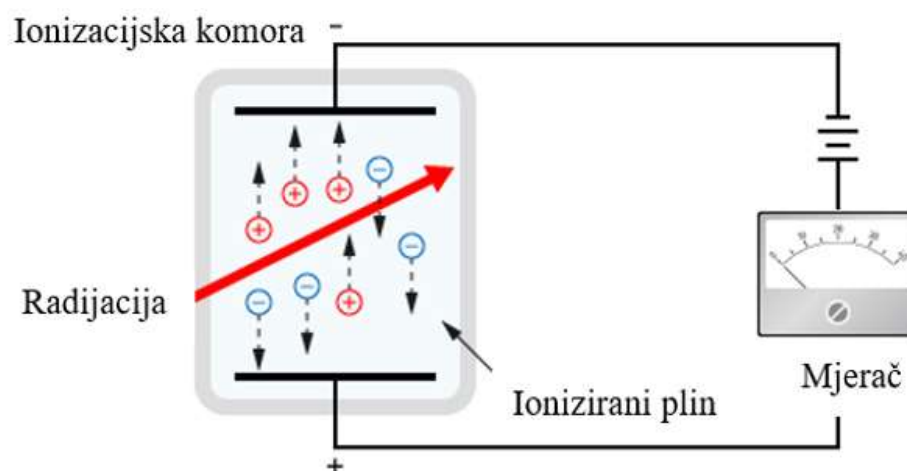
Slika 3-1 Shematski prikaz scintilacijske ćelije (Agrwal et al., 2022)



Slika 3-2 Scintilacijska ćelija (The Instrument Manufacturing Division of Pylon Electronics Inc., 2017)

3.1.2. Ionizacijska komora

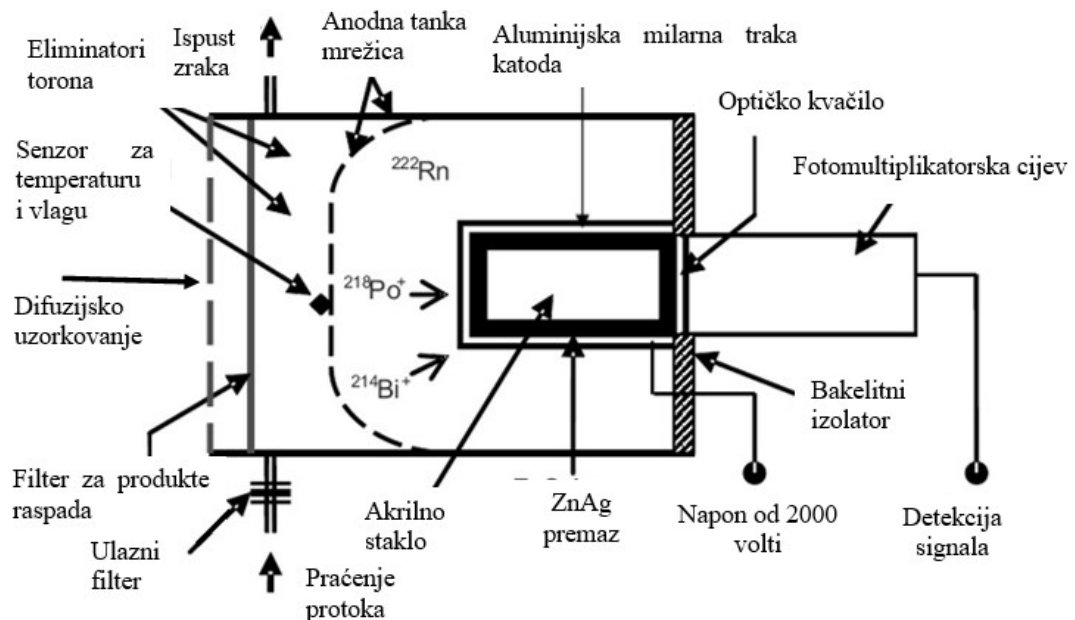
U ionizacijskoj komori se uspostavlja električno polje između dvije ili više elektroda. Filtrirani zrak se unosi u ćeliju ili difuzijom ili pumpanjem, a pojava struje se detektira uzrokovana ionizacijom plina unutar komore (Slika 3-3). Izmjerena razina ionizacije je ona uzrokovana raspadom radona i njegovim produktima raspada. Pritom se mjeri ili totalna ionizacija u komori ili se impulsi uzrokovani pojedinom alfa česticom mjere posebno. Potonja metoda ima prednost razlikovanja impulsa uzrokovanih različitim produktima raspada i radonom. U posljednje vrijeme komercijalne ionizacijske komore se koriste kao sekundarni standard u kalibracijskim laboratorijima radona (Miles, 2004).



Slika 3-3 Ionizacijska komora (Matsusada precision Inc., 2022)

3.1.3. Elektrostatičko prikupljanje produkata radioaktivnog raspada

Instrumenti koji upotrebljavaju ovaj princip također imaju komoru u koju zrak ulazi ili difuzijom ili upumpavanjem. U ovom slučaju detektori suhog agregatnog stanja se koriste za mjerenje energije alfa čestica. Detektor koji ga pokriva, se nalazi pod visokim naponom u svrhu prikupljanja produkata raspada. Dio alfa čestica emitiran od strane produkata raspada ulaze u detektor. Kao i kod ionizacijskih komora, moguće je razlikovati različite produkte raspada kako bi se poboljšalo vrijeme detekcije instrumenta. Količina produkata raspada prikupljena na nabijenom ekranu ovisi o vlažnosti uzorkovanog zraka, pa se koristi i sredstvo za sušenje (Miles, 2004) (Slika 3-4). Shema uređaja za kontinuirano praćenje radona na principu elektrostatičkog prikupljanja produkata radioaktivnog raspada (Gaware et al., 2011)



Slika 3-4 Shema uređaja za kontinuirano praćenje radona na principu elektrostatičkog prikupljanja produkata radioaktivnog raspada (Gaware et al., 2011)

3.2. Pasivne metode

Kod pasivnih metoda mjerenja koriste se jednokratni detektori, odnosno materijali koji imaju sposobnost apsorpcije radona. Uzorkovanje radona se odvija temeljem prirodne difuzije plina u prostoriji tijekom određenog vremenskog intervala, nakon čega se uzorak analizira u laboratoriju i utvrđuje se koncentracija radona u prostoriji tijekom vremena izlaganja (Nuvap, 2020).

3.2.1. Metoda upotrebe aktivnog ugljena

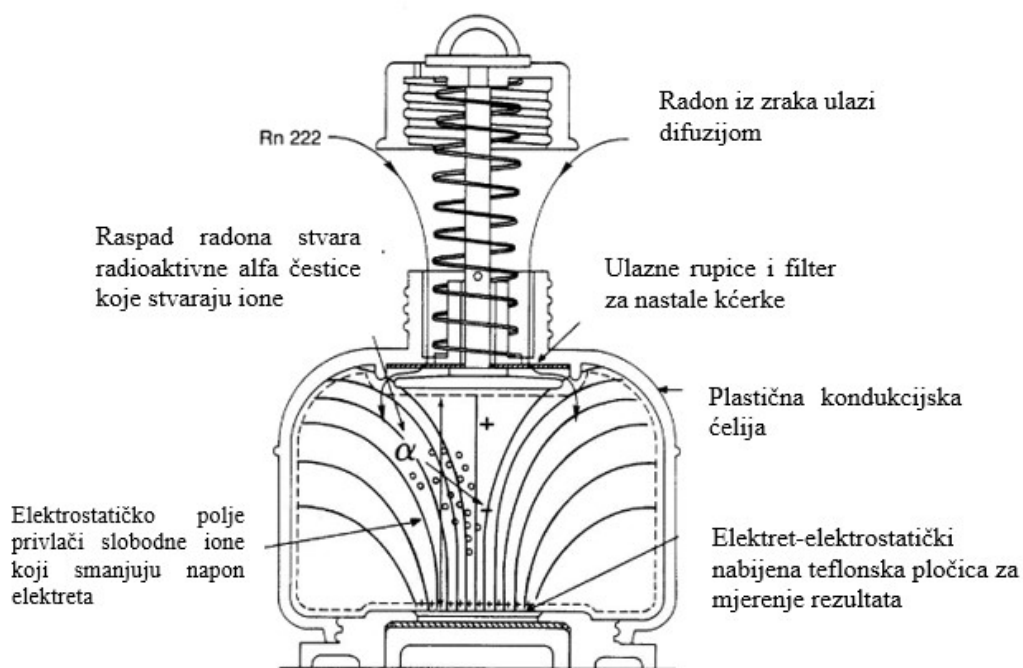
Aktivni ugljen ima sklonost adsorpciji mnogih plinova uključujući radon. Radon adsorbiran na ugljenu raspada se, a nastali proizvodi raspada ostaju na ugljenu, te je na taj način moguće mjerenje adsorbiranog radona gama spektrometrijom emisija olova-214 i bizmuta-214. Alternativa gama spektrometriji je tekućinsko scintilacijsko brojanje. Za to se ugljen koji je bio izložen radonu pomiješa s tekućom scintilacijskom smjesom, u kojem se radon lako otapa. Mjerenje tekućine se odvija u standardnoj opremi za tekućinsko scintilacijsko brojanje. Detektori se obično sastoje od posteljice aktivnog ugljena ugrađene u metalnu mrežicu, unutar metalnog spremnika s poklopcem koji se može ukloniti. Prije upotrebe otvoreni spremnik se zagrijava kako bi se uklonio sav adsorbirani plin i vodena para. Poklopac se zatim učvrsti na spremnik i spremnik se stavlja na poziciju prikupljanja gdje se uklanjanjem poklopca ugljen izlaže plinu. Na kraju intervala izlaganja ponovno se stavlja poklopac i učvršćuje, a spremnik se vraća u laboratorij na analizu. Detektori ugljena nisu pravi integratori, jer se radon apsorbiran na početku izlaganja brzo raspada i djelomično se desorbira iz ugljena tijekom izlaganja (Slika 3-5). Desorpcija se može smanjiti ako se između površine sloja ugljena i atmosfere postavi difuzijska barijera. Mjerenja se provode u razdoblju od 2-7 dana, budući da je poluživot radona 3,82 dana. Mogućnost njegove desorpcije iz drvenog ugljena također smanjuje mogućnost za duža mjerenja. Detektori koji rabe tehnologiju uporabe aktivnog ugljena mogu obaviti točna mjerenja koncentracije radona. Glavni nedostatak njihove upotrebe u mjerenjima koncentracije radona u zgradama je velika varijabilnost koncentracije radona tijekom dužeg vremena, kako je već prethodno navedeno pouzdanost mjerenja s aktivnim ugljenom u razdoblju dužem od 7 dana opada, tako da rezultat nije reprezentativan za dugoročni prosjek (Miles, 2004).



Slika 3-5 Prikaz zatvorenog spremnika sa zaštitom trakom na poklopcu (desno) i otvorenog spremnika s mrežicom za smještaj posteljice (lijevo) (Darwish Al-Azmi et al., 2012)

3.2.2. Elektretičke ionizacijske komore

Elektretici imaju trajan površinski naboj s potencijalom i do nekoliko kV. Uređaj funkcionira na sljedećem principu: teflonski elektret je smješten na dnu kondukcijske plastične ćelije (elektretska ionska ćelija) (Slika 3-6). Radon difuzijom ulazi u komoru, a elektretu vrijednost naboja opada zbog ionizacije zraka uzrokovane raspadom radona i produkata raspada. Ovakvi detektori mjere u realnom vremenu izlaganja radonu, ali imaju ograničen interval mjerenja. Također su osjetljivi na gamma zračenje i promjene tlaka zraka te je potrebno korigirati rezultate (Miles, 2004).



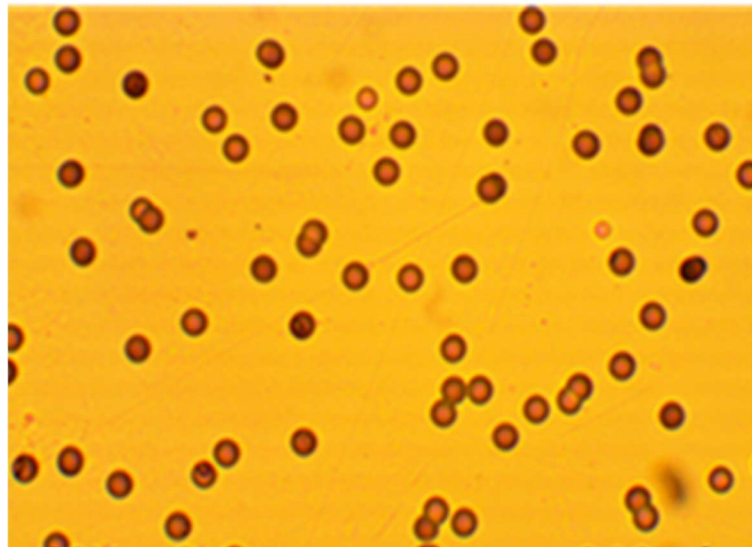
Slika 3-6 Prikaz elektretičke ionizacijske komore za mjerenje radona (Rad Elec Inc., 2022)

3.2.3. Detektori na bazi urezanih tragova

Detektori tragova oslanjaju se na korištenje plastičnog materijala za snimanje tragova alfa čestica radona i njegovih produkata raspadanja (Slika 3-7). Ovo oštećenje se može kasnije otkriti uranjanjem plastike u otopinu NaOH ili KOH, ponekad s dodatkom etanola. Za mjerenje radona općenito se koriste tri materijala: LR-115 (tanki film u boji celulozni nitrat na inertnoj podlozi), polikarbonat i CR-39 (poli alil diglikol karbonat, PADC). Polikarbonatni detektori zahtijevaju elektrokemijsko jetkanje, u kojem se izmjenični napon pušta preko detektora tijekom jetkanja. Studija ispitivanja različitih laboratorija u međunarodnim usporedbama pasivnih detektora radona pokazala je da se LR-115, polikarbonat i CR-39 mogu koristiti za točna mjerenja.

Razlike u točnosti između laboratorija bile su uzrokovane razlikama u kontroli kvalitete prije nego u upotrijebljenim materijalima. Obično se koriste dvije vrste detektora urezanih tragova, jedan (poznat kao zatvoreni detektor) koji se sastoji od detektora traga unutar spremnika koji omogućuje da radon-222 difundira u njega. Drugi (poznat kao otvoreni detektor) sastoji se od ogoljenog materijala za otkrivanje tragova izloženog okolnoj atmosferi. Zatvoreni detektori isključuju produkte raspada radona koji su prisutni u okolnoj atmosferi, bilježeći samo one alfa čestice koje stvara radon koji ulazi u spremnik i produkti

raspadanja koji nastaju iz njega. Ovaj oblik detektora stoga daje rezultat koji se odnosi na pravu prosječnu koncentraciju plina radona tijekom vremena izlaganja. Otvoreni detektori, međutim, bilježe alfa čestice koje potječu iz radona-222 i radona-220 i njihovih proizvoda raspada u ambijentalnoj atmosferi. Njihova reakcija na radon i njegove produkte raspadanja kao funkcija faktora ravnoteže (F) ovisi o korištenom detektorskom materijalu. Otvoreni detektori izrađeni od Kodak LR-115 imaju osjetljivost izraženu kao funkciju F, koja je srednja između detektora pravog radonskog plina i detektora istinskog ravnotežnog ekvivalenta radona (EER), što je bliže stvarnoj reakciji na plin radon. Otvoreni CR-39 detektori imaju odziv koji uvelike ovisi o F i ne preporučuju se za mjerenja. Detektori urezanih tragova općenito se koriste u razdobljima u trajanju od mjeseca do godine. Kako bi se dobili što reprezentativniji rezultati iz zgrade, trajanje bi trebalo biti što je duže moguće. Međutim, praktična razmatranja često ograničavaju trajanje izlaganja, a neki materijali detektora gube osjetljivost s dužim izlaganjem u zraku. Detektori urezanih tragova proizvode se i obrađuju u mnogim laboratorijima (Miles, 2004).



Slika 3-7 Prikaz tragova alfa čestica dobivenog procesom jetkanja (Kadhun et al., 2016)

4. RADON U GRAĐEVINSKOM MATERIJALU

Obzirom na vrstu izvora radijacije iz građevinskog materijala izlaganje dijelimo na unutarnje i vanjsko. Vanjsko izlaganje je uzrokovano gama zračenjem. Unutarnje izlaganje je uzrokovano udisanjem radona i torona i njihovih produkata raspada. Radon u građevinskom materijalu nastaje kao produkt raspada uranija, koji je prisutan u mnogim građevinskim materijalima u tragovima. Obzirom da je radon inertan plin, lako se transportira kroz porozan medij poput građevinskog materijala, ali samo manji dio nastalog radona prijeđe iz građevinskog materijala u atmosferu. Radon u višim dijelovima građevina većinom potječe iz građevinskog materijala. Povećanje koncentracije radona u unutarnjim prostorijama iz izvora građevinskog materijala je većinom u iznosu od 10 do 20 Bq/m³, ali ponekad, rjeđe, dosegnu i vrijednosti od 1000 Bq/m³. Za razliku od radona, čije je porijeklo u građevinam većinom iz izvora tla i vode, toron u unutarnjim prostorijama gotovo uvijek potječe iz građevinskog materijala. Koncentracije torona su većinom niske, a rjeđi su materijali s povišenim iznosima (Europska komisija, 1999; IAEA, 2015)

4.1. Prethodna istraživanja

Iako je područje istraživanja doprinosa koncentracije radona ekshalacijom iz građevinskog materijala novije, već su obavljena brojna ispitivanja na tu temu. Nažalost zbog nedostatka usuglašenog protokola koriste se razni uređaji, obrade podataka i iskazi u različitim mjernim jedinicama. U dosad najvećoj objavljenoj bazi podataka sakupljeni su podaci o emanaciji i ekshalaciji više od 1929 uzoraka građevinskog materijala korištenih u 17 članica Europske Unije i u 4 zemlje izvan Europske Unije. Baza sadrži stopu ekshalacije za 1482 uzorka izraženih masenom te površinskom ekshalacijom. U bazi je prisutan veliki raspon podataka dobivenih mjerenjima (vidljivo u Tablica 4-1), a kao mogući uzrok raspršenosti podataka navodi se različiti sadržaj Ra226, stopa emanacije, gustoća materijala te debljina uzorka (Nuccetelli et al., 2020).

Tablica 4-1 Prikaz vrijednosti masene ekshalacije građevinskog materijala iz baze podataka (Nuccetelli et al., 2020)

Vrsta građevinskog materijala	Srednja vrijednost mBq kg ⁻¹ h ⁻¹	Raspon mBq kg ⁻¹ h ⁻¹
Cement	21	8–32
Agregati	31	6–84
Arhitektonski kamen	196	3–2232

Većina mjerenja koristi se metodama koje koriste zatvorene posude (akumulacijske ćelije) i aktivne monitore za mjerenje aktivnosti koncentracije radona (dinamičke metode). Zatvorene posude se mogu koristiti i u slučaju uporabe pasivnih detektora poput detektora na bazi urezanih tragova, a i elektreta. Neki od znanstvenih članaka se baziraju na usporedbi podataka dobivenih različitim metodama što ponekad rezultira u većim razlikama u podacima dobivenim različitim metodama mjerenja. Ovakva razlika vidljiva je u očitavanju podataka dobivenih koristeći detektor na bazi urezanih tragova gdje su vrijednosti stope ekshalacije veće od onih dobivenih korištenjem aktivnih metoda. Unatoč širokoj uporabi dinamičke metode mjerenja zbog njene dostupnosti i relativno jeftine investicije, tehnički standard za mjerenja niti standard za izračune ekshalacije radona još uvijek nije postavljen. Nijedna zemlja, osim Gruzije, još nije postavila referentnu graničnu vrijednost ekshalacije radona u građevinskom materijalu jer se smatra kako je praćenje granične vrijednosti Ra226 dovoljna za praćenje i sprječavanje povećanih vrijednosti radona u unutarnjim prostorijama (Nuccetelli et al., 2020).

Glavni ciljevi koji se postavljaju u standardizaciji protokola procjene ekshalacije radona su (Nuccetelli et al., 2020):

- Standardizacija oblika i veličine uzorka, ili usvajanja karakteristika referentnog uzorka koji se upotrebljava u testovima poput provjere mehaničkih svojstava materijala
- Standardizacija omjera volumena akumulacijske ćelije i volumena uzorka, potencijalna uporaba omjera danih u normi ISO 11665-9: 2019 standard (ISO, 2019).
- Standardizacija mjernih jedinica u kojima se iskazuju vrijednosti ekshalacije
- Uporaba standardiziranih protokola za mjerenje gustoće materijala
- Uporaba uređaja u kojima je eliminiran mogućnost preklapanja mjerenja Rn220 i Rn222

5. REGULATIVA

Europska je komisija istraživala problematiku regulatorne kontrole građevinskog materijala obzirom na pojavnost prirodno radioaktivnih nuklida u njima (NORM). Svrha uspostavljanja regulatorne kontrole radioaktivnosti materijala je ograničavanje izlaganja populacije radijaciji iz materijala s povišenim vrijednostima. Izloženost populacije zračenju iz izvora radona iznosi 55 % (Prema Tuccimei, iz UNSCEAR, 2000). Unatoč tako visokom postotku doprinosa radona ukupnom zračenju, trenutne regulatorne kontrole podrazumijevaju samo izračun indeksa koncentracije aktivnosti koji se određuje sljedećom formulom:

$$I = C_{Ra226}/300 \text{ Bq/kg} + C_{Th232}/200 \text{ Bq/kg} + C_{K40}/3000 \text{ Bq/kg}, \quad (5-1)$$

gdje su C_{Ra226} , C_{Th232} i C_{K40} koncentracije aktivnosti u Bq/kg odgovarajućih radionuklida u građevinskom materijalu (prema Tuccimei, iz Kovler et al. (2005) (Narodne novine, 2018). Ovakav izračun aktivnosti ne pruža pouzdan alat za izračun koncentracije radona u unutarnjim prostorima nastalog ekshalacijom iz tla i građevinskog materijala. Parametar koji nije regulatorno kontroliran, ali prikladno izražava unutarnju akumulaciju radona iz geoloških izvora je stopa ekshalacije radona (Bq/m^3) (Prema Tuccimei, iz Carrera et al., 1997). Obzirom na prethodno spomenutu problematiku, nužno je uspostaviti standarde praćenja ovog parametra i opreme za mjerenje istog (Prema Tuccimei, iz Quindos et al., 1994; Chao et al., 1997; De Martino et al., 1998; Keller et al., 2001; Petropolous et al., 2001; Ferry et al., 2002; Gutiérrez et al., 2004; Kovler et al., 2005; Tuccimei et al., 2006).

6. UREĐAJ ZA MJERENJE RADONA

6.1. Konstrukcija uređaja



Slika 6-1 Mjerni uređaj RTM 2200 Soil Gas, (Sarad, 2007)

- A- Signalna lampica za indicaciju upozorenja na uređaju kada mjereni parametri odskoču od pred definiranih granica
- B- Odvodni ventil zraka
- C- Dovodni ventil zraka
- D- Zaštita od ulaska vode u uređaj
- 1- Ulazni otvor u mjerni uređaj
- 2- Izlazni otvor iz mjernog uređaja
- 3- Konektorska žica za paljenje/gašenje uređaja za zaštitu od unosa vode
- 4- Konektorska žica za signalnu lampicu
- 5- Utor za punjenje
- 6- Utor za komunikacijski priključak
- 7- Utor za USB priključak
- 8- Upravljačka tipka
- 9- Indikator punjenja baterije
- 10- Signalni indikator
- 11- LCD ekran osjetljiv na dodir

6.2. Princip mjerenja

RTM2200 soil gas je uređaj koji koristi aktivnu metoda mjerenja radona. Koncentracija radona i torona se mjeri preko novonastalih kćerki unutar mjerne komore. Po završetku raspada, novonastala jezgra Po-218 postaje kratko pozitivno nabijena, što se javlja kao posljedica raspršivanja elektrona u okolinu tijekom emitiranja alfa čestice. Ovi ioni se skupljaju uslijed električnih sila na površini poluvodičkog detektora, u ovom slučaju pomoću ionski implementiranog silicijskog detektora. Količina (broj) prikupljenih Po-218 iona je proporcionalan koncentraciji plina radona unutar komore. Po-218 se raspada s vremenom poluraspada od 3,05 minuta i otprilike samo polovinu svih raspada (emitiranih čestica) će detektor registrirati. Ravnoteža između brzine raspada R_n i detektirane aktivnosti Po-218 iznosi oko 15 min. Upravo to vrijeme predstavlja minimalno potrebno vrijeme za dobivanje podatka o ravnotežnoj koncentraciji R_n . S odmakom od 3 sata se detektira i novonastali ion Po-214, obzirom na njegovo vrijeme poluraspada. Pomoću alfa spektroskopije moguće je razlikovati točan broj različitih novonastalih kćerki radona, obzirom da su im energije ionizacije različite (Sarad, 2007).

Uređaji koji rade na principu spektroskopije nude dva načina izračuna za koncentraciju radona, jedan je ("spori") izračunava koncentraciju radona preko oba raspada Po-218 i Po-214, a drugi način izračunava koncentraciju radona preko raspada Po-218 ("brzi"). Prednost "brzog" načina izračuna je brza reakcija na promjene koncentracije dok "spori", daje dvostruko veću osjetljivost u usporedbi s "brzim". Veća osjetljivost smanjuje statističku pogrešku mjerenja, koja ovisi samo o broju prebrojanih raspada (Sarad, 2007).

7. METODOLOGIJA MJERENJA I KORIŠTENI UZORCI

U ovom ispitivanju korišten je uređaj za mjerenje radona RTM2200 i inertna hermetički zatvorena posuda spojena na mjerni uređaj prema principu prikazanom na slici 7-1. Ispitivanja su obavljena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u laboratoriju za spektroskopiju. Tijekom ispitivanja korišteno je 5 uzoraka različitih građevinskih materijala (Tablica 7-1). U svrhu mjerenja radona u građevinskom materijalu odabran je sporiji način mjerenja s dvosatnim intervalom mjerenja unutar jednog 24-satnog ciklusa. Vrijednosti pozadinske koncentracije radona i torona iznosile su 0 Bq/m^3 prilikom stavljanja uzoraka u posudu.

Tablica 7-1 Uzorci korišteni u ispitivanju

Uzorak	Masa (kg)	² Gustoća (kg/m ³)	Stanje
Cemix kvarcni pijesak	1	2650	rastresito
Mivka građevinski pijesak	1	2650	rastresito
Batapati granit	2,575	2580	srasla stijenska masa
Nexe cement	1	1440	rastresito
Porfiroblast. Granit	0,598	2580	srasla stijenska masa

Obzirom da uređaj RTM2200 posjeduje opciju mjerenja radona i torona istovremeno, obrađene su izmjerene koncentracije za radon i toron.

² Gustoća pijeska korištena u proračunima za izračun ekshalacije radona odnosi se na gustoću mineralnog zrna, dok je za cement korištena nasipna gustoća u suhom stanju.



Slika 7-1 Inertna posuda s uzorkom spojena na mjerni uređaj RTM2200

8. REZULTATI

U tablicama 8-1 i 8-2 prikazani su glavni statistički parametri distribucije ekshalacije radona građevinskih materijala: srednja vrijednost i raspon, standardna devijacija i koeficijent varijabilnosti. Podaci su dobiveni 24-satnim mjerenjem uređajem RTM2200 radona u uzorcima građevinskog pijeska, cementa te granita. Vrijednosti volumne koncentracije radona pretvoreni su u vrijednosti masene ekshalacije koristeći sljedeću formulu:

$$E_m = \frac{CV\lambda/M}{T+(1/\lambda)(e^{-\lambda T}-1)} \quad (7-1)$$

gdje je E_m stopa masene ekshalacije ($Bq\ kg^{-1}\ h^{-1}$); C je integrirana koncentracija radona (ravnotežna koncentracija) ($Bq\ m^{-3}\ h^{-1}$); V je volumen zraka (m^3); λ je konstanta raspada radona (h^{-1}); T je vrijeme mjerenja (h), te M je masa uzorka (kg) (Jasaitis et Pečiuliene 2021).

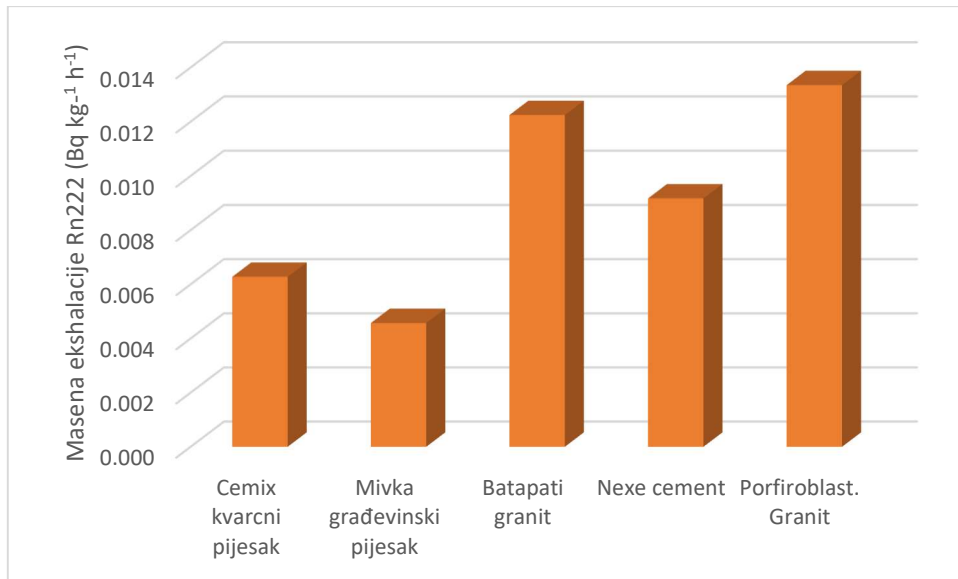
Tablica 8-1 Vrijednosti volumne koncentracije radona pridobivene mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnom razdoblju

Ciklus	Vrijeme od početka mjerenja (h)	Mivka - građevinski pijesak	Porfirobl. granit	Batapati granit	Cemix	Nexe cement	Jedinica
1	2	7,37	16,45	56,43	17,08	7,19	Bq/m^3
2	4	3,83	23,49	92,98	15,24	42,52	Bq/m^3
3	6	7,52	30,84	130,28	19,89	71,34	Bq/m^3
4	8	39,38	53,32	205,26	17,57	79,48	Bq/m^3
5	10	30,06	39,98	206,59	28,04	85,25	Bq/m^3
6	12	58,41	61,18	252,96	38,23	89,53	Bq/m^3
7	14	73,74	43,89	266,67	35,72	112,90	Bq/m^3
8	16	72,87	60,54	291,96	53,33	112,15	Bq/m^3
9	18	94,92	62,37	304,61	40,97	151,47	Bq/m^3
10	20	117,51	69,04	342,55	46,17	146,11	Bq/m^3
11	22	108,96	68,76	357,78	48,95	159,23	Bq/m^3
12	24	133,21	81,46	384,62	42,05	175,76	Bq/m^3
	Srednja vrijednost	62,32	50,94	241,06	33,61	102,74	Bq/m^3

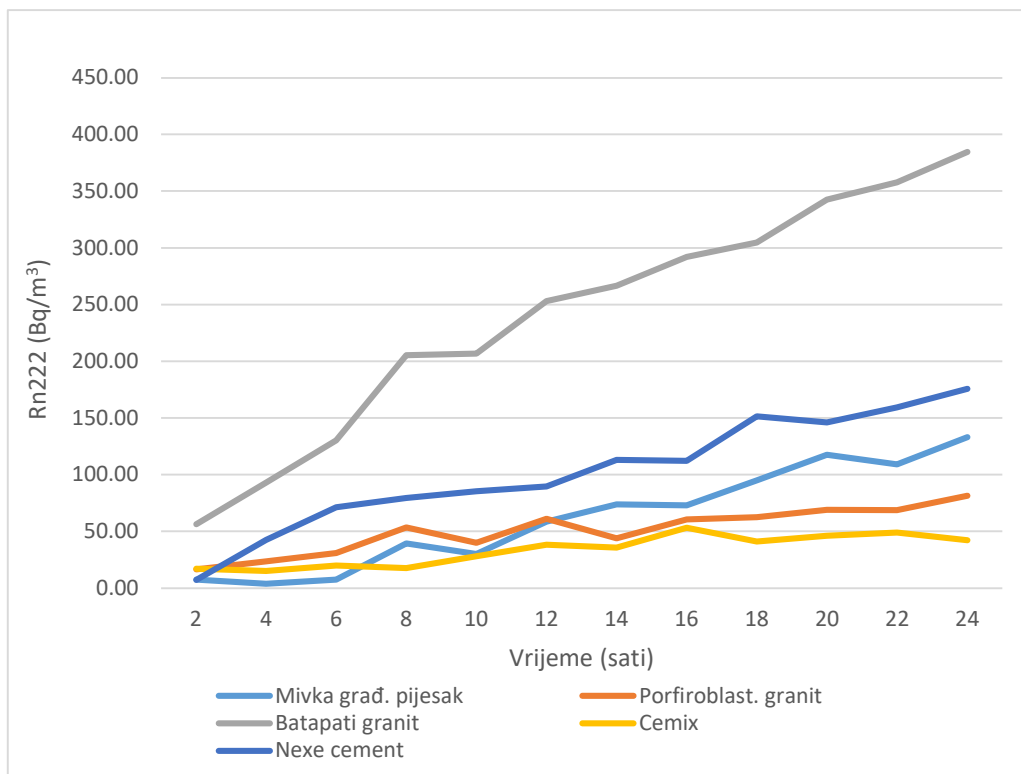
Tablica 8-2 Rezultati masene ekshalacije radona dobiveni mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnom razdoblju

Radon Rn222				
Uzorak	Srednja vrijednost (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)	Raspon (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)	Standardna devijacija (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)	CV
Cemix kvarcni pijesak	0,006	0,0008 - 0,043	0,01	1,9
Mivka građevinski pijesak	0,005	0,002 - 0,019	0,005	0,99
Batapati granit	0,012	0,003 - 0,056	0,015	1,24
Nexe cement	0,009	0,003 - 0,016	0,007	0,78
Porfiroblast. Granit	0,013	0,003 - 0,070	0,019	1,45

Vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn222 kod uzoraka Batapati granita i Nexe cementa su najveće i u prosjeku su iznosile 241,06 te 102,74 Bq/m³ (Tablica 8-1). Vrijednosti prosječne stope masene ekshalacije radona najviše za uzorke Batapati granita te profiroblastičnog granita odnosno 0,012 te 0,013 Bq kg⁻¹ h⁻¹ (Tablica 8-2). Prema parametru koeficijenta varijabilnosti može se primijetiti kako su vrijednosti masene ekshalacije radona za 24-satni ciklus mjerenja s intervalom od 2 sata raspršene, odnosno prisutan je veći raspon izmjerenih vrijednosti masene ekshalacije radona (Tablica 8-2, vidljivo u Prilog 1; 2; 3; 4; 5).



Slika 8-1 Prikaz prosječne stope masene ekshalacije radona različitih građevinskih materijala



Slika 8-2 Vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn222 u različitim uzorcima građevinskih materijala

Grafički prikaz prirasta izmjerene koncentracije aktivnosti radona za 24-satno razdoblje (Slika 7-3) jasno pokazuje izraženiji prirast kod uzorka Batapati granita i početnu višu vrijednost aktivnosti radona u odnosu na ostale uzorke.

8.1. Rezultati mjerenja torona

Rezultati mjerenja aktivnosti torona transformirani su u stopu masene ekshalacije koristeći slijedeću formulu:

$$E_m = ((\lambda \cdot V_0) \cdot \frac{C}{e^{-\lambda(\frac{V_1}{Q})}}) / M \quad (7-2)$$

gdje je E_m stopa masene ekshalacije ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$); C je integrirana koncentracija radona (ravnotežna koncentracija) ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$); V_0 je volumen zraka u akumulacijskoj komori (m^3); V_1 je volumen komore uređaja i dovodne cijevi (m^3); λ je konstanta raspada torona (h^{-1}); T je vrijeme mjerenja (h), te M je masa uzorka (kg) (Tuccimei et al., 2009).

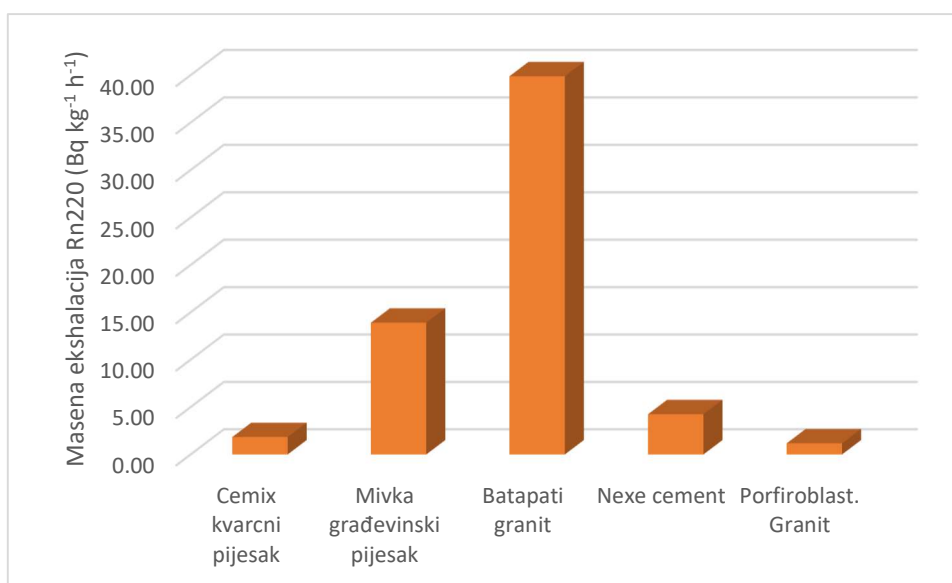
Tablica 8-3 Vrijednosti volumne koncentracije torona pridobivene mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnom razdoblju

Ciklus	Vrijeme (h)	Mivka građevinski pijesak	Porfirobl . granit	Batapati granit	Cemix	Nexe cement	Jedinica
1	2	75,59	3,75	157,252	7,30	16,39	Bq/m^3
2	4	69,87	3,82	112,014	11,17	39,66	Bq/m^3
3	6	64,27	3,77	87,6469	15,12	22,59	Bq/m^3
4	8	58,92	7,44	170,064	3,76	8,91	Bq/m^3
5	10	94,57	0,00	284,766	11,07	30,92	Bq/m^3
6	12	89,68	0,00	266,743	10,90	25,87	Bq/m^3
7	14	56,04	7,32	234,301	10,78	17,16	Bq/m^3
8	16	56,27	0,00	212,673	14,31	21,07	Bq/m^3
9	18	63,34	14,71	237,906	7,19	4,18	Bq/m^3
10	20	43,34	14,53	126,162	0,00	37,48	Bq/m^3
11	22	47,57	0,00	87,1399	3,56	20,78	Bq/m^3
12	24	55,94	7,24	155,385	7,19	8,41	Bq/m^3
	Srednja vrijednost	64,62	5,22	177,67	8,53	21,12	Bq/m^3

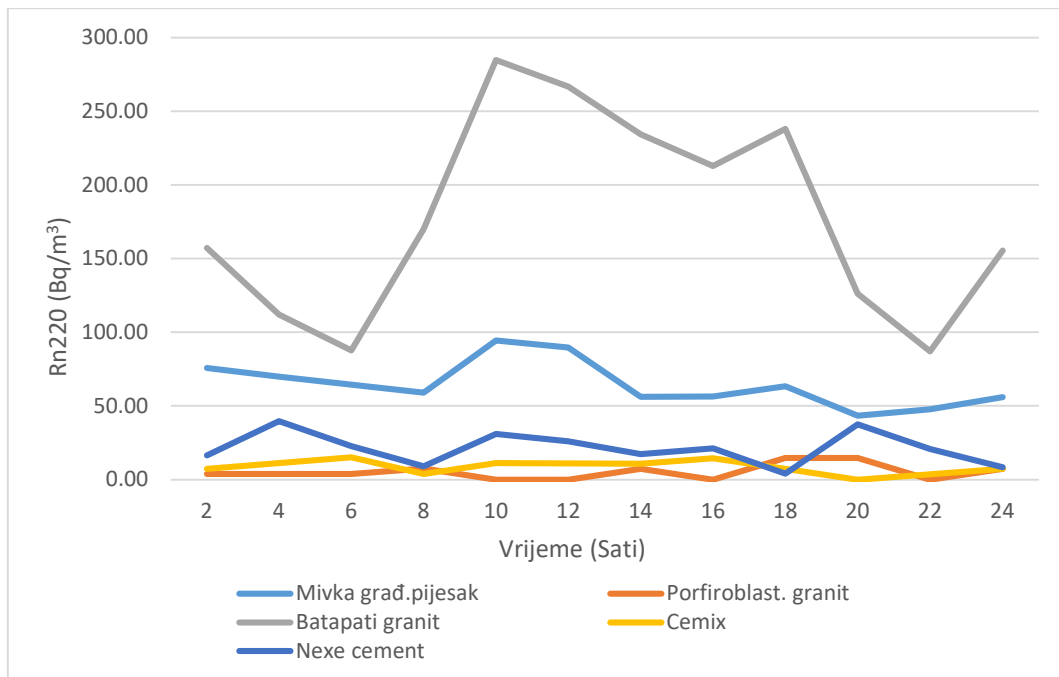
Tablica 8-4 Rezultati masene ekshalacije torona dobivenih mjerenjem uređajem RTM2200 u 24-satnom razdoblju

Toron Rn220				
Uzorak	Srednja vrijednost (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)	Raspon (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)	Standardna devijacija (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)	CV
Cemix kvarcni pijesak	1,83	0,00 - 3,25	0,98	0,5
Mivka građevinski pijesak	13,90	9,32 - 20,34	3,35	0,24
Batapati granit	39,88	19,56 - 63,91	15,39	0,39
Nexe cement	4,25	0,84 - 7,97	2,24	0,53
Porfiroblast. Granit	1,17	0,00 - 3,30	1,18	1,00

Uzorak Batapati granita i Mivka građevinskog pijeska imaju najveće prosječne vrijednosti ravnotežne koncentracije torona 177,67 i 64,62 Bq/m³ te najviše vrijednosti stope masene ekshalacije torona u iznosima od 39,88 te 13,90 Bq kg⁻¹ h⁻¹ (Tablica 8-3; Tablica 8-4). Prema parametru koeficijenta varijabilnosti može se primijetiti kako su vrijednosti ekshalacije torona za 24-satni ciklus mjerenja s intervalom od 2 sata za sve uzorke raspršeni osim profiroblastičnog granita, odnosno da su prisutni veliki rasponi u vrijednostima ekshalacije dobivenim mjerenjem torona (Tablica 8-4, Slika 8-5 vidljivo u Prilog 1; 2 ;3; 4; 5).



Slika 8-3-3 Prikaz prosječne stope masene ekshalacije torona različitih građevinskih materijala



Slika 8-8-4 Vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn220 u različitim uzorcima građevinskih materijala

9. DISKUSIJA

Statistički parametri potkrepljuju raspršenost podataka rezultata mjerenja, pa se stoga srednja vrijednost uzoraka ekshalacije radona i torona pojedinih materijala u uzorku, dobivenom u takvom intervalu, ne može vjerodostojno predstaviti aritmetičkom sredinom. Rezultati mjerenja radona za uzorke Batapati i Mivka građevinski pijesak statistički imaju najvjerodostojnije rezultate, dok su mjerenja uzorka porfiroblastičnog granita imala najvjerodostojnije rezultate za toron. Raspršenost rezultata mjerenja torona može se pripisati kratkom vremenu poluraspada, pa dolazi do većih odstupanja u mjerenju. Uzorak granita Batapati ima najveće vrijednosti stope ekshalacije radona i torona. Iz priloženog dijagrama (Slika 7-5) vidljivo je kako vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn220 kod većine uzoraka ne dosežu visoke vrijednosti (preko 76 Bq/m^3 se smatra visokim) (Europska komisija, 1999; IAEA, 2015).

Iz priloženog dijagrama (Slika 7-3, Prilozi 1-5) vidljivo je kako vrijednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti Rn222 za sve uzorke ne dosežu ekstremne vrijednosti (do 1000 Bq/m^3), no ipak su za nekoliko 10-taka Bq/m^3 veći od prosječnog prirasta koncentracije aktivnosti iz izvora građevinskog materijala (prirast od 10 do 20 Bq/m^3) (Europska komisija, 1999; IAEA, 2015). Vrijednosti masene ekshalacije prema tablici Nuccetelli et al. za materijale cementa, agregata i arhitektonskog kamena su daleko viši od vrijednosti izračunatih u ovom istraživanju (Tablica 4-1; Tablica 8-2; Tablica 8-4). Takva razlika se može pripisati puno većem uzorku pridobivenih podataka u sjedinjenoj bazi podataka, različitim mjernim ciklusima i intervalima mjerenja, drukčijim količinama materijala korištenim te drukčijoj mjernoj opremi.

ZAKLJUČAK

Hermetički zatvorena inertna komora s RTM 2200 mjernim uređajem daje pouzdane podatke mjerenja, a ne zahtjeva veliku pripremu i vrijeme obrade podataka. Vremenski interval mjerenja od 24 sata pokazao se kao dovoljan na nekim uzorcima za dobivanje pouzdanih podataka o koncentraciji radona i torona, dok su drugi imali znatno veći raspon podatka. Usporedba rezultata dobivenih tijekom ovog ispitivanja s rezultatima iz objedinjene baze ukazuje na velike razlike u dobivenim vrijednostima. Takav način usporedbe podataka bez točnih informacija o vrsti uređaja, vremenu trajanja ispitivanja, stanju uzorka, gustoći, načinu izračuna masene ekshalacije dovodi do većih razlika u rezultatima i ne dozvoljava pouzdanu korelaciju. Kako bi korelacija izmjerenih vrijednosti budućih mjerenja bila točna i opravdana ključno je raditi na novoj bazi s uniformnim standardima mjerenja. Prisutnost i povišene vrijednosti koncentracije radona u uzorcima pokazuju da je potreban razvoj protokola mjerenja radona u svrhu smanjenja doprinosa koncentraciji istog u unutarnjim prostorijama iz izvora građevinskog materijala. Vrijednosti ravnotežne koncentracije za uzorke granita ukazuju na potrebu praćenja koncentracije radona za granite, obzirom da su izmjerene vrijednosti njihove koncentracije nekoliko puta veće od prosječne procijenjene vrijednosti koncentracije za građevinski materijal. U ovom eksperimentu prethodno nije obavljena detaljna mineraloška analiza i točan sastav uzoraka nije poznat, točnije elementi u tragovima na koje bi mogli biti vezani uranij odnosno radij. Utvrđivanje detaljnijeg mineraloškog sastava odnosno mineraloške građe građevinskih materijala donijelo bi novi uvid u uzrok povišene koncentracije radona u građevinskom materijalu. Objedinjena baza podataka je ukazala na velike razlike u mjerenjima i još jednom potvrdila potrebu za jedinstvenim protokolom mjerenja i obrade izmjerenih koncentracija radona. Smjernice za postavljanje standarda mjerenja radona u građevinskim materijalima predstavljene u radu Nuccetelli et al. nužni su koraci svakog budućeg istraživanja. Negativan utjecaj radona na živu tvar je neosporiv stoga je ključno regulatorno definirati granične vrijednosti.

POPIS LITERATURE

AL-AZMI, D., MUSTAPHA, A., KARUNAKARA, N. 2012. *Radon adsorbed in activated charcoal—a simple and safe radiation source for teaching practical radioactivity in schools and colleges*. Physics Education, 47(4), str. 471-475

AGARWALI, T., K., GAWARE, J., J., SAPRA, B., K. 2022 *CFD-based approach to optimize operating parameters of a flow-through scintillation cell for measurement of ^{220}Rn in indoor environments*. Environmental Science and Pollution Research, 29(11), str. 16404-16417

JASAITIS, D., PEČIULIENE, M. 2021. *Natural Radioactivity and Radon Exhalation from Building Materials in Underground Parking Lots*. . Appl. Sci., 11(16), str. 7475

EUROPSKA KOMISIJA. 1999. Radiation Protection 112, *Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials*. Directorate-General Environment

GAWARE, J. J., SAHOO, B.K., SAPRA, B. K., MAYYA, Y. S. 2011. *Indigenous development and networking of online radon monitors in the underground uranium mine*. Indian association for radiation and protection, 34(1), str: 37-4

IAEA. 2015. *Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural, Sources of Radiation- Specific Safety Guide*, No. SSG-32, International Atomic Energy Agency

KADHIM, F. N., JEBUR, L., A. 2016. *Studying Different Etching Methods Using CR-39 Nuclear Track Detector*. Scientific Research Publishing Inc. 4, str. 45-53

MILES, J. 2004. *Methods of radon measurement and devices*. Chilton, UK: National Radiological Protection Board

NUCCETELLI, C., LEONARDI, F., TREVISI, R., 2020. *Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the european database analysis*. Journal of Environmental Radioactivity. 225

SARAD GMBH. 2007. *Measuring Principals – Decay Statistics – Test Planning*. Dresden: SARAD GmbH

TUCCIMEI, P., CASTELLUCCIO, M. , SOLIGO, M., MORONI, M. 2009. *Radon exhalation rates of building materials: experimental, analytical Protocol and classification criteria*. Building Materials, 7, str. 259-273

BRITANNICA. 2021. *Radon chemical element*.

URL: <https://www.britannica.com/science/radon> (12.4.2022.)

HARVARD UNIVERSITY. 2022. *Radon's Progeny Decay*.

URL: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/radons-progeny-decay> (12.5.2022.)

MATSUSADA PRECISION. 2022. Ionization chamber. (22.12.2022.)

URL: https://www.matsusada.com/application/ps/ionization_chambers/

NUCLEAR FORENSIC SEARCH PROJECT. 2022. *Nuclear forensics: a scientific search problem decay chains* (10.6.2022.)

URL: <https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>

NUVAP. 2020. *Radon gas active & continuous monitoring*. (12.4.2022.)

URL: https://www.nuvap.com/wp-content/uploads/2020/08/Radon-Gas-Monitoring_WPEng2020.pdf (12.5.2022.)

RADELEC. *Radon Monitoring*. 2022. (19.12.2022.)

URL: https://www.radelec.com/radon_monitoring.html

THE INSTRUMENT MANUFACTURING DIVISION OF PYLON ELECTRONICS INC.
2017. Scintillation Cell Continuous Sampling Radon Measurements (21.12.2022.)
URL:<https://pylonelectronics-radon.com/2017/09/08/scintillation-cell-continuous-sampling-radon-measurements/>

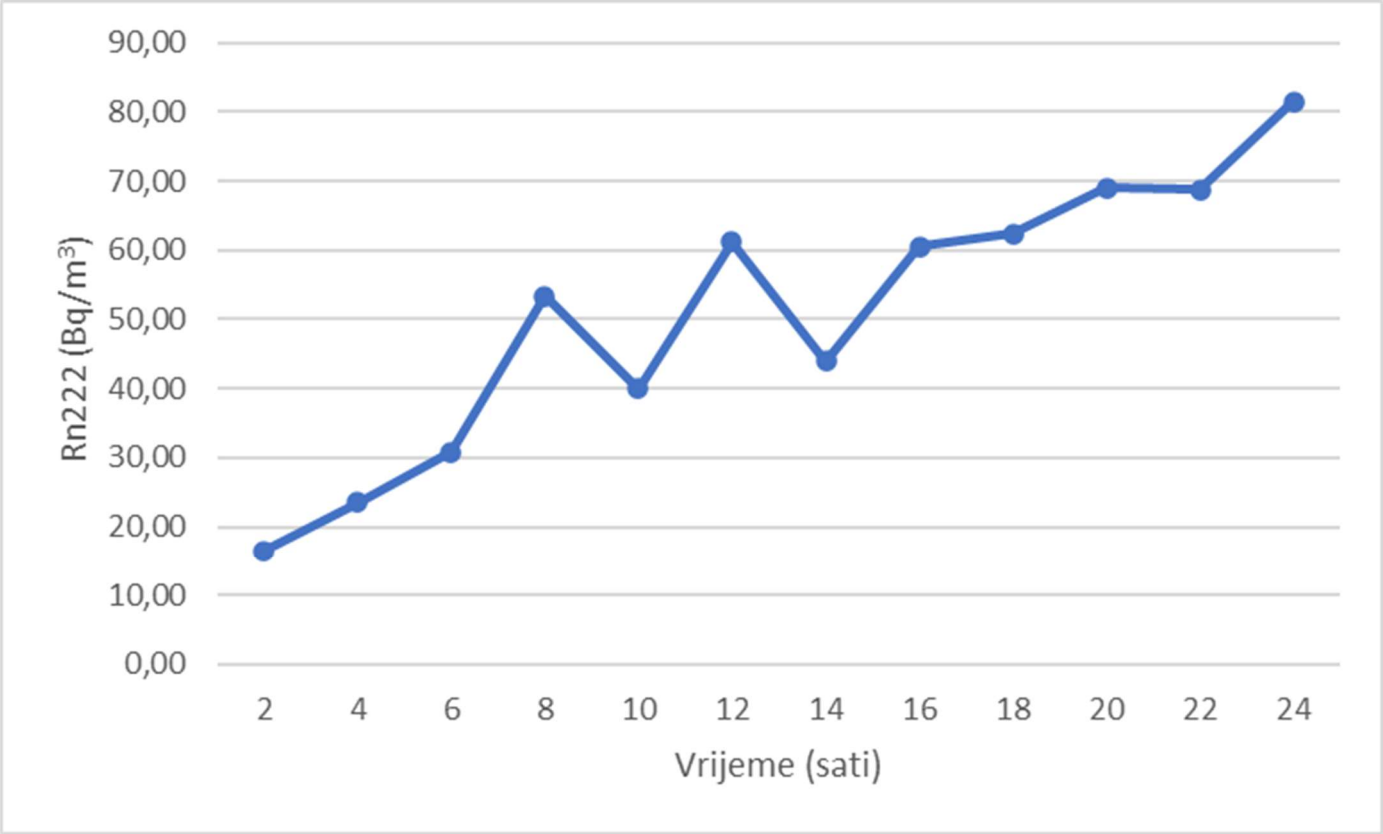
WIKIPEDIA. 2014. *Decay chain(4n+2, Uranium series)*.
URL:https://bs.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Decay_chain%284n%2B2,_Uranium_series%29.svg (10.6.2022.)

WIKIPEDIA. 2021. *Radon*. URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Radon> (20.4.2022.)

PRILOZI

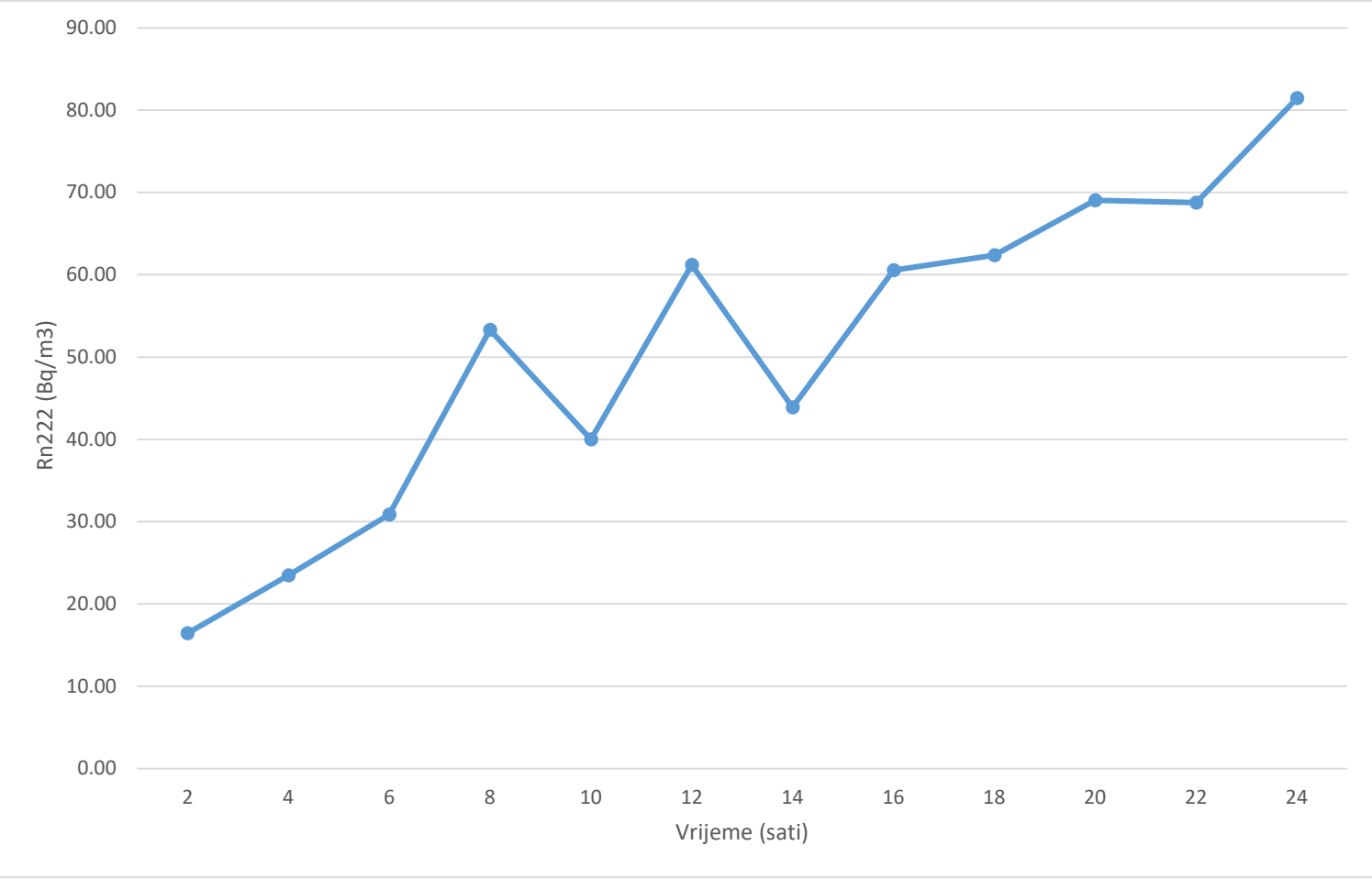
Prilog 1 Rezultati mjerenja uzorka Bela gradbena mivka bijeli građevinski pijesak

Ciklus	Radon	Toron	Jedinica	Radon	Toron	Radon	Toron	Jedinica	Sati
1	7,37	75,59	Bq/m ³	0,0185	8,60	0,0185	8,60	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	2
2	3,83	69,87	Bq/m ³	0,0024	3,95	0,0012	1,98	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	4
3	7,52	64,27	Bq/m ³	0,0021	2,42	0,0007	0,81	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	6
4	39,38	58,92	Bq/m ³	0,0063	1,66	0,0016	0,42	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	8
5	30,06	94,57	Bq/m ³	0,0031	2,13	0,0006	0,43	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	10
6	58,41	89,68	Bq/m ³	0,0042	1,68	0,0007	0,28	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	12
7	73,74	56,04	Bq/m ³	0,0039	0,90	0,0006	0,13	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	14
8	72,87	56,27	Bq/m ³	0,0030	0,79	0,0004	0,10	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	16
9	94,92	63,34	Bq/m ³	0,0031	0,79	0,0003	0,09	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	18
10	117,51	43,34	Bq/m ³	0,0031	0,49	0,0003	0,05	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	20
11	108,96	47,57	Bq/m ³	0,0024	0,49	0,0002	0,04	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	22
12	133,21	55,94	Bq/m ³	0,0025	0,52	0,0002	0,04	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	24
			Srednja vrijednost	0,0046	2,04	0,0004	0,1851	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			Raspon	0,0021 - 0,0185	0,49 - 8,60			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			St.dev.	0,0045	2,31			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			CV	1,0	1,1				



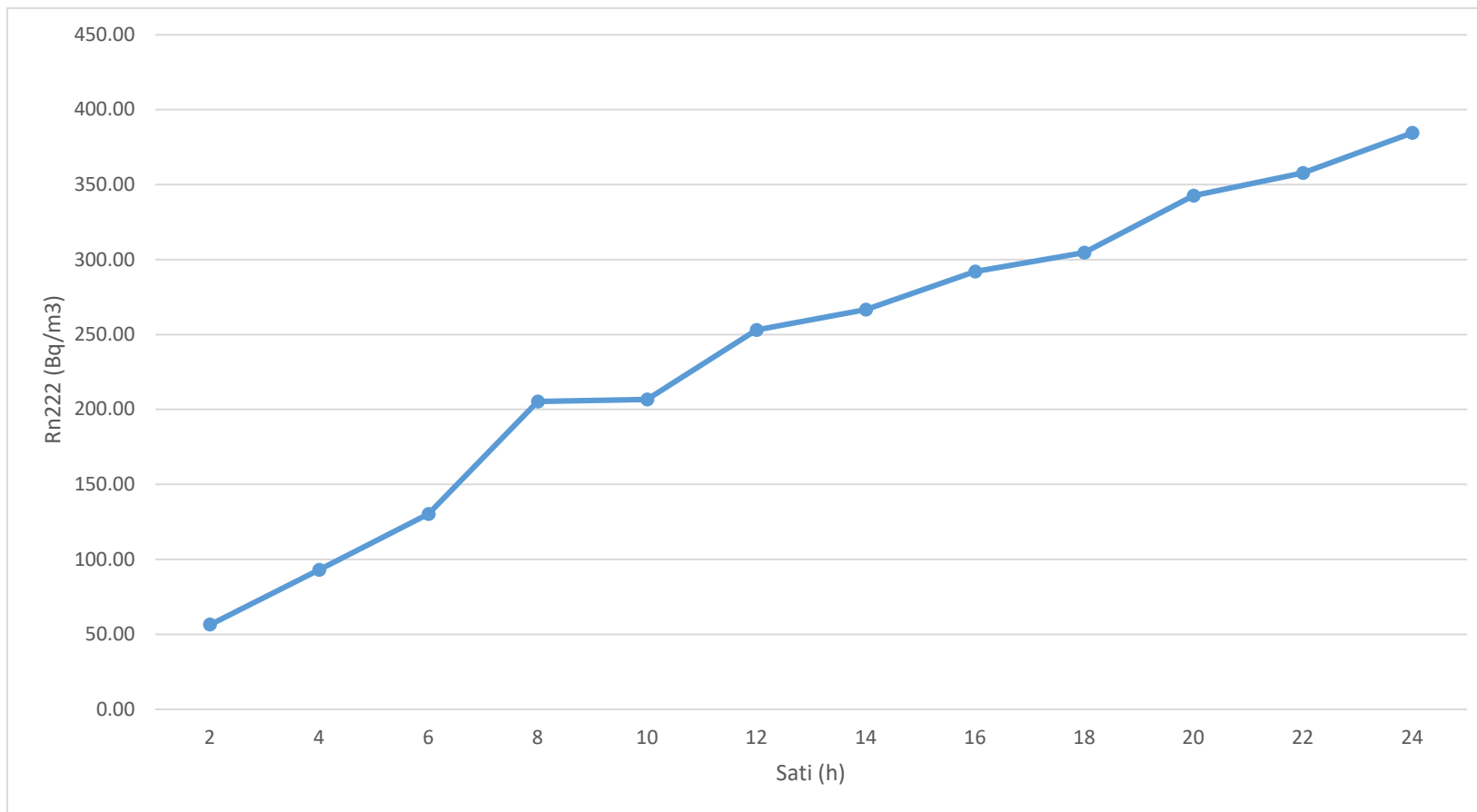
Prilog 2 Rezultati mjerenja uzorka porfiroblastičnog granita

						Kumulativno			
Ciklus	Radon	Toron	Jedinica	Radon	Toron	Radon	Toron	Jedinica	Sati
1	16,45	3,75	Bq/m ³	0,0706	0,71	0,0706	0,71	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	2
2	23,49	3,82	Bq/m ³	0,0254	0,36	0,0127	0,18	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	4
3	30,84	3,77	Bq/m ³	0,0149	0,24	0,0050	0,08	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	6
4	53,32	7,44	Bq/m ³	0,0146	0,35	0,0036	0,09	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	8
5	39,98	0,00	Bq/m ³	0,0070	0,00	0,0014	0,00	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	10
6	61,18	0,00	Bq/m ³	0,0075	0,00	0,0013	0,00	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	12
7	43,89	7,32	Bq/m ³	0,0040	0,20	0,0006	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	14
8	60,54	0,00	Bq/m ³	0,0043	0,00	0,0005	0,00	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	16
9	62,37	14,71	Bq/m ³	0,0035	0,31	0,0004	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	18
10	69,04	14,53	Bq/m ³	0,0031	0,27	0,0003	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	20
11	68,76	0,00	Bq/m ³	0,0026	0,00	0,0002	0,00	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	22
12	81,46	7,24	Bq/m ³	0,0026	0,11	0,0002	0,01	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	24
			Srednja vrijednost	0,0133	0,2130	0,0012	0,0194	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			Raspon	0,0026 - 0,0706	0,00 - 0,71			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			St.dev.	0,0193	0,21			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			CV	1,4	1,0				



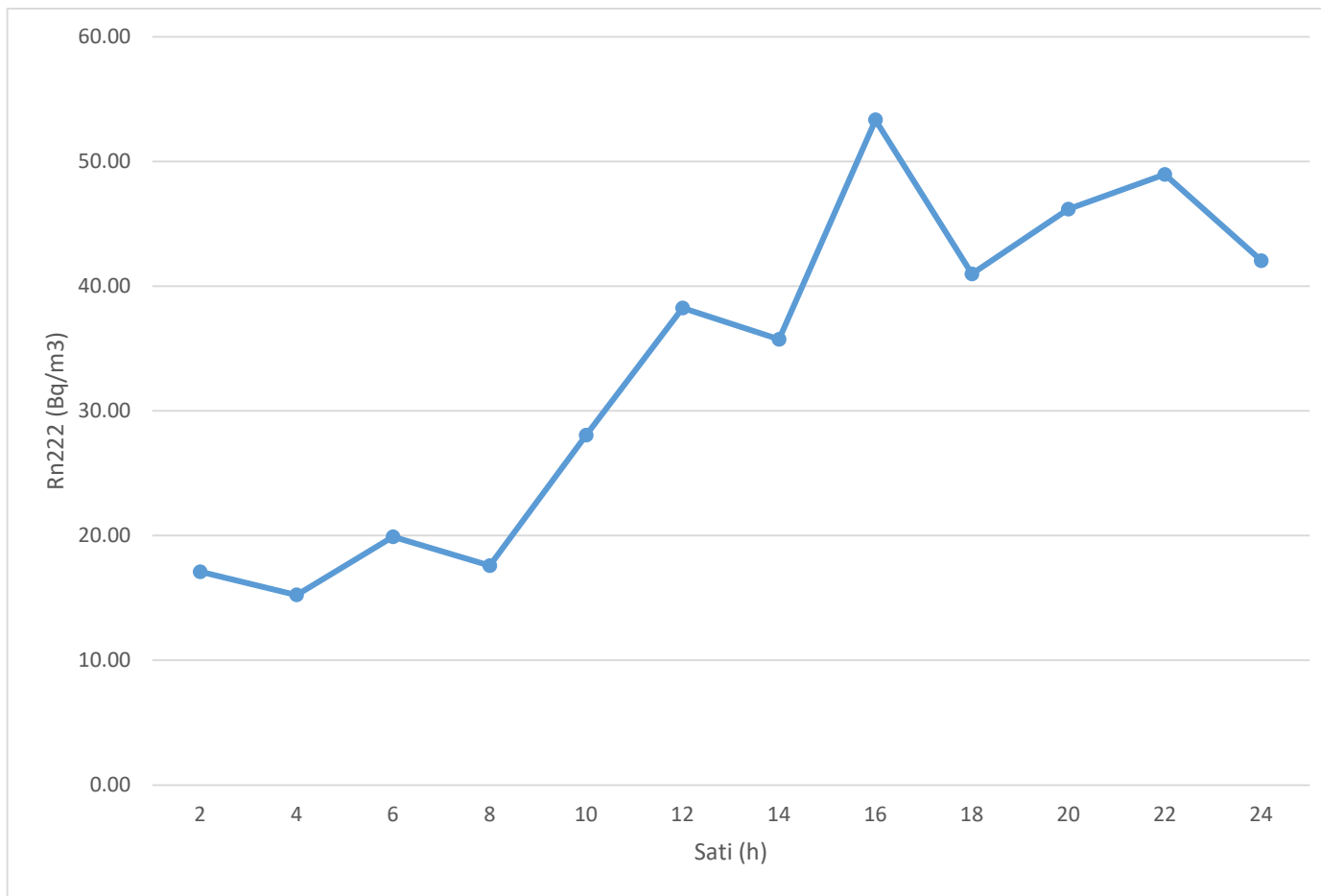
Prilog 3 Rezultati mjerenja uzorka Batapati granita

Ciklus	Radon	Toron	Jedinica	Kumulativno				Jedinica	
				Radon	Toron	Radon	Toron		
1	56,43	157,2515	Bq/m ³	0,056	6,95	0,0563	6,95	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	2
2	92,98	112,0135	Bq/m ³	0,023	2,46	0,0117	1,23	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	4
3	130,28	87,64691	Bq/m ³	0,015	1,28	0,0049	0,43	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	6
4	205,26	170,064	Bq/m ³	0,013	1,86	0,0033	0,47	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	8
5	206,59	284,7659	Bq/m ³	0,008	2,49	0,0017	0,50	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	10
6	252,96	266,7427	Bq/m ³	0,007	1,95	0,0012	0,32	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	12
7	266,67	234,301	Bq/m ³	0,006	1,46	0,0008	0,21	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	14
8	291,96	212,6732	Bq/m ³	0,005	1,16	0,0006	0,15	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	16
9	304,61	237,9057	Bq/m ³	0,004	1,16	0,0004	0,13	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	18
10	342,55	126,1621	Bq/m ³	0,004	0,55	0,0004	0,06	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	20
11	357,78	87,13992	Bq/m ³	0,003	0,35	0,0003	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	22
12	384,62	155,3855	Bq/m ³	0,003	0,57	0,0002	0,05	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	24
			Srednja vrijednost	0,012	1,85	0,0011	0,1685	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			Raspon	0,003 - 0,056	0,35 - 6,95			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			St.dev.	0,015	1,75			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			CV	1,2	0,9				



Prilog 4 Rezultati mjerenja uzorka Cemix kvarcnog pijeska

Ciklus	Radon	Toron	Jedinica	Kumulativno				Jedinica	
				Radon	Toron	Radon	Toron		
1	17,08	7,30	Bq/m ³	0,0430	0,83	0,0430	0,83	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	2
2	15,24	11,17	Bq/m ³	0,0097	0,63	0,0048	0,32	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	4
3	19,89	15,12	Bq/m ³	0,0056	0,57	0,0019	0,19	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	6
4	17,57	3,76	Bq/m ³	0,0028	0,11	0,0007	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	8
5	28,04	11,07	Bq/m ³	0,0029	0,25	0,0006	0,05	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	10
6	38,23	10,90	Bq/m ³	0,0028	0,20	0,0005	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	12
7	35,72	10,78	Bq/m ³	0,0019	0,17	0,0003	0,02	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	14
8	53,33	14,31	Bq/m ³	0,0022	0,20	0,0003	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	16
9	40,97	7,19	Bq/m ³	0,0013	0,09	0,0001	0,01	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	18
10	46,17	0,00	Bq/m ³	0,0012	0,00	0,0001	0,00	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	20
11	48,95	3,56	Bq/m ³	0,0011	0,04	0,0001	0,00	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	22
12	42,05	7,19	Bq/m ³	0,0008	0,07	0,0001	0,01	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	24
			Srednja vrijednost	0,0063	0,2634	0,0006	0,0239	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			Raspon	0,0008 - 0,0430	0,00 - 0,83			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			St.dev.	0,0118	0,27			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			CV	1,9	1,0				



Prilog 5 Rezultati mjerenja uzorka Nexe cement

Ciklus	Radon	Toron	Jedinica	Kumulativno				Jedinica	
				Radon	Toron	Radon	Toron		
1	7,19	16,39	Bq/m ³	0,0166	1,72	0,0166	1,72	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	2
2	42,52	39,66	Bq/m ³	0,0248	2,06	0,0124	1,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	4
3	71,34	22,59	Bq/m ³	0,0186	0,78	0,0062	0,26	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	6
4	79,48	8,91	Bq/m ³	0,0117	0,23	0,0029	0,06	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	8
5	85,25	30,92	Bq/m ³	0,0081	0,64	0,0016	0,13	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	10
6	89,53	25,87	Bq/m ³	0,0060	0,45	0,0010	0,07	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	12
7	112,90	17,16	Bq/m ³	0,0055	0,25	0,0008	0,04	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	14
8	112,15	21,07	Bq/m ³	0,0042	0,27	0,0005	0,03	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	16
9	151,47	4,18	Bq/m ³	0,0046	0,05	0,0005	0,01	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	18
10	146,11	37,48	Bq/m ³	0,0036	0,39	0,0004	0,04	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	20
11	159,23	20,78	Bq/m ³	0,0033	0,20	0,0003	0,02	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	22
12	175,76	8,41	Bq/m ³	0,0030	0,07	0,0003	0,01	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	24
			Srednja vrijednost	0,0092	0,59	0,0008	0,0539	Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			Raspon	0,003 - 0,016	0,0003 - 0,0166			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			St.dev.	0,0072	0,65			Bq kg ⁻¹ h ⁻¹	
			CV	0,8	1,1				

