

Protokol za kontrolu kvalitete (QC) za određivanje koncentracije aktivnosti radona u vodi na tekućinskom scintilacijskom brojaču

Bencetić, Sara

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:780449>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

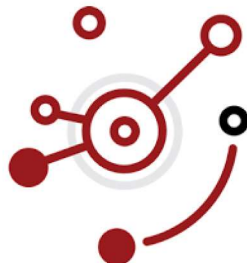


Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU



SARA BENCETIĆ

**PROTOKOL ZA KONTROLU KVALITETE (QC) ZA
ODREĐIVANJE KONCENTRACIJE RADONA U VODI
NA TEKUĆINSKOM SCINTILACIJSKOM BROJAČU**

Diplomski rad

Osijek, 2022.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU



SARA BENCETIĆ

**PROTOKOL ZA KONTROLU KVALITETE (QC) ZA
ODREĐIVANJE KONCENTRACIJE RADONA U VODI
NA TEKUĆINSKOM SCINTILACIJSKOM BROJAČU**

Diplomski rad

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja akademskog naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I
INFORMATIKE**

Osijek, 2022.

Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Marine Poje Sovilj i izv. prof. dr. sc. Vanje Radolića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizika i informatika na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Marini Poje Sovilj za pomoć i podršku pri izvođenju eksperimentalnog dijela te tijekom pisanja ovog diplomskog rada. Zahvaljujem se na strpljenju, svakom savjetu i izdvojenom vremenu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Goranu Šmitu za pomoć prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem se komentoru izv. prof. dr. sc. Vanji Radoliću na pomoći prilikom pisanja ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se kolegama za pruženu pomoć i međusobnu podršku.

Posebne zahvale mojim roditeljima i sestrama na pruženoj podršci, ljubavi i razumijevanju tijekom studiranja.

I za kraj, hvala mom zaručniku koji je sve lijepo i manje lijepo prošao sa mnom kroz sve ove godine.

PROTOKOL ZA KONTROLU KVALITETE (QC) ZA ODREĐIVANJE KONCENTRACIJE RADONA U VODI NA TEKUĆINSKOM SCINTILACIJSKOM BROJAČU

Sara Bencetić

Sažetak

U ovom je diplomskom radu predstavljen protokol za kontrolu kvalitete za određivanje koncentracije radona u vodi na tekućinskom scintilacijskom brojaču. U početnom dijelu rada su ukratko objašnjeni pojmovi radioaktivnosti i zračenja, a zatim je objašnjeno što je to radon i kako utječe na nas. Nakon toga, opisana je metoda mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi kao i način rada korištenih mjernih uređaja. U radu su istraženi utjecaji pojedinih dijelova mjernog procesa na kvalitetu rezultata mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi: ovisnost temperature skladištenja uzorka, ovisnost amplituda mućkanja uzorka i koktela u viali, vrijeme mućkanja uzorka i koktela te na kraju ekstrakcija uzorka. Dobiveni rezultati ukazuju da temperatura skladištenja uzoraka utječe na rezultate mjerenja koncentracije radona odnosno uzorke je potrebno čuvati na nižim temperaturama. Nadalje, izmjerena koncentracija radona ne ovisi o amplitudi kojom se uzorak mućka, ali ovisi o trajanju mućkanja. Na kraju je utvrđeno da nema potrebe provoditi višestruku ekstrakciju uzorka jer se većina radona već nakon prvog mućkanja zadrži u koktelu.

Ključne riječi: radioaktivnost, zračenje, radon, LSC, koncentracija aktivnosti radona
(43 stranica, 19 slika, 10 tablica, 35 literaturnih navoda)

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

Komentor: izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić, doc. dr. sc. Goran Šmit, mr. sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 9. studenog 2022.

QUALITY CONTROL PROTOCOL (QC) FOR THE DETERMINATION OF RADON CONCENTRATION IN WATER ON A LIQUID SCINTILLATION COUNTER

Sara Bencetić

Abstract

This thesis presents a quality control protocol for determining the concentration of radon in water using a liquid scintillation counter. In the initial part of the paper, the concepts of radioactivity and radiation are briefly explained, and then it is explained what radon is and how it affects us. After that, the method of measuring the concentration of radon activity in water is described, as well as the method of operation of the used measuring devices. The paper studied the effects of individual parts of the measurement process on the quality of the results of measuring the concentration of radon activity in water: the dependence of the temperature of the sample storage, the dependence of the shaking amplitudes of the sample and the cocktail in the vial, the time of shaking the sample and the cocktail, and finally the extraction of the sample. The obtained results indicate that the storage temperature of the samples affects the results of the radon concentration measurement, that is, the samples need to be stored at lower temperatures. Furthermore, the measured radon concentration does not depend on the amplitude with which the sample is shaken, but it does depend on the duration of shaking. In the end, it was determined that there is no need to carry out multiple extractions of the sample because most of the radon remains in the cocktail after the first shaking.

Keywords: radioactivity, radiation, radon, LSC, concentration of radon activity

(43 pages, 19 figures, 10 table, 35 references)

Supervisor: Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD

Co-Supervisor: Associate Professor Vanja Radolić, PhD

Reviewer: Marina Poje Sovilj, PhD; Vanja Radolić, PhD; Goran Šmit, PhD; Slavko Petrinšak, MSc

Thesis accepted: November 9th, 2022

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RADIOAKTIVNOST	2
2.1. RADIOAKTIVNOST I ZRAČENJE	2
2.2. VRSTE RADIOAKTIVNOG RASPADA	3
2.2.1. Alfa (α) raspad	3
2.2.2. Beta (β) raspad	5
2.2.3. Gama (γ) raspad	7
2.3. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA	8
3. OPĆENITO O RADONU	10
3.1. FIZIKALNO-KEMIJSKA OBILJEŽJA RADONA	10
3.2. RADON U SVAKODNEVNOM OKRUŽENJU	12
4. OPASNOST ZA ZDRAVLJE	17
5. TEHNIKA MJERENJA RADONA U VODI	20
5.1. LSC METODA	20
5.1.1. Scintilacijski proces u koktelu	22
5.1.2. Fotomultiplikator	23
5.2. TEKUĆINSKI SCINTILACIJSKI DETEKTOR TriCarb 2900	24
5.3. KALIBRACIJA UREĐAJA	28
5.4. UZORKOVANJE VODE I PRIPREMA UZORKA	29
6. EKSPERIMENTALNI DIO	30
6.1. POSTUPCI MJERENJA I PRIPREMANJE UZORKA	30
6.2. REZULTATI MJERENJA I STATISTIČKA OBRADA PODATAKA	32
6.2.1. Ovisnost temperature skladištenja uzorka	32
6.2.2. Ovisnost amplitude mućkanja uzorka i koktela u viali	34
6.2.3. Vrijeme mućkanja uzorka i koktela	35
6.2.4. Ekstrakcija uzorka	37
7. ZAKLJUČAK	39
8. LITERATURA	40

1. UVOD

Radon je radioaktivni plin bez mirisa, boje i okusa. Dolazi iz tla i nakuplja se u zatvorenim prostorima. Koncentracija radona u zraku mjeri se kao broj radioaktivnih raspada u sekundi u jednom metru kubnom zraka (Bq m^{-3}). Jedan bekerel odgovara raspadu jedne jezgre u sekundi.

Međunarodna agencija za istraživanje karcinoma (IARC) i Nacionalni toksikološki program SAD-a klasificirali su radon kancerogenim za ljude. Objedinjena analiza velikih europskih studija procjenjuje da se za povećanje radona od 100 Bq m^{-3} rizik od karcinoma pluća povećava za 16% [1]. Kako bi se smanjio broj oboljenja povezanih s radonom, u obzir moraju biti uzete metode i alati temeljeni na čvrstim znanstvenim dokazima. Tako se u većini zemalja započelo s identifikacijom područja s većim izmjerenim koncentracijama radona u zraku, tlu i vodi, tzv. radonski prioritetna područja [2].

Mjerenje radona u vodi za ljudsku potrošnju na nacionalnoj razini provodi se sukladno odredbama Zakona o vodi za ljudsku potrošnju («Narodne novine», brojevi 56/13, 64/15 i 104/17) i Pravilnika o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe («Narodne novine», broj 125/17) [3].

U ovom diplomskom radu opisan je protokol za mjerenja kontrole kvalitete za određivanje koncentracije radona u vodi. Za mjerenje koncentracije radona potrebno je koristiti posebne detektore. Sva mjerenja provedena u ovom diplomskom radu vršila su se LSC metodom na tekućinskom scintilacijskom detektoru TriCarb 2900, koji je kasnije u radu detaljnije opisan.

Mjerenja smo provodili u svrhu utvrđivanja varijabli koji utječu na kvalitetu i osiguranje kvalitete mjerenja: od prikupljanja uzoraka na terenu (uzorkovanja), pripremanje uzoraka u viali, transport uzoraka do laboratorija i samo mjerenje. Provedena su ispitivanja ovisnosti izmjerene koncentracije aktivnosti radona o temperaturi skladištenja uzorka (temperatura hladnjaka i sobna temperatura), ovisnost izmjerene koncentracije aktivnosti radona o amplitudi mućkanja uzorka i koktela u viali, vremenu mućkanja uzorka i koktela te efikasnosti ekstrakcije uzorka. Postupak i rezultati zajedno sa zaključkom prikazani su na kraju ovog rada.

2. RADIOAKTIVNOST

2.1. RADIOAKTIVNOST I ZRAČENJE

Na pojam radioaktivnosti i zračenja većina ljudi prvo pomisli na atomsku bombu, razorne pojave koje mogu uslijediti zbog lošeg rukovođenja nuklearnim elektranama ili radioaktivnim otpadom. Zbog straha koji nuklearna energija izaziva kod ljudi, prednosti i korist koju donosi nisu poznati kod većine stanovništva [4].

Radioaktivnost je spontani proces u kojem dolazi do pretvorbe i raspadanja nestabilne jezgre nekog kemijskog elementa. Za vrijeme raspadanja i transformacije jezgre dolazi do oslobađanja viška energije koja se pojavljuje u obliku ionizirajućeg zračenja.

Postoje dvije osnovne vrste zračenja, a to su ionizirajuće i neionizirajuće zračenje. Neionizirajuće zračenje nema dovoljno energije za ioniziranje tvari i otpuštanje elektrona, energija koju sadrži dovoljna je tek za pomicanje i titranje atoma u molekulama. Vidljivi dio elektromagnetskog spektra (svjetlost), radiovalovi i mikrovalovi su primjeri za neionizirajuće zračenje. Suprotno neionizirajućem zračenju, ionizirajuće zračenje ima dovoljnu količinu energije za ioniziranje atoma. Prema izvoru možemo ih podijeliti na prirodne i umjetne izvore ionizirajućeg zračenja [5].

Ionizirajuće zračenje nije vidljivo, ne možemo ga osjetiti dodiranjem, opipom ili njuhom. Upravo zbog toga je otkriveno tek krajem 19. stoljeća [4].

Wilhelm Conrad Röntgen zaslužan je za otkriće rendgenskih zraka 1895. godine kada je za vrijeme izvođenja pokusa uočio svjetlucanje fluorescentnog papirnatozastora. Svoja opažanja i otkrića opisao je u radu „*O jednoj novoj vrsti zraka*“ gdje navodi različita ponašanja katodnih zraka i takozvanih X-zraka. Uočio je kako X-zrake ne mogu biti otklonjene u magnetskom polju te ih je uspoređivao sa zrakama svjetlosti.

Nakon otkrića rendgenskih zraka dolazi i do otkrića „uranijevih zraka“, tj. „Becquerelovih zraka“. Becquerelove zrake nazvane su prema francuskom fizičaru Henriu Antoineu Becquerelu. Pokus s fluorescencijom izveo je uz pomoć dvosoli kalijeva i uranijeva sulfata koje je postavio na fotografsku ploču. Promatrao je što će se dogoditi na direktnoj sunčevoj svjetlosti te je došao do zaključka kako sunčeva svjetlost izaziva emitiranje zraka iz minerala dvosoli. Taj zaključak je kasnije opovrgnuo. Nakon novih pokusa, došao je do

rezultata da same soli uranija ispuštaju zrake koje su nevidljive i koje prolaze kroz neprozirni papir. Otkriće Becquerelovih zraka uvelike je doprinijelo kasnijem otkriću radioaktivnosti.

Bračni par Curie, Maria Skłodowska-Curie i suprug Pierre Curie nastavili su s istraživanjem novih pojava. Maria Skłodowska-Curie započela je s proučavanjem tvari sa sličnim svojstvima kao što su svojstva uranija. Otkrila je kako torij, kao i njegovi spojevi emitiraju Becquerelove zrake. Marie je 1898. godine uvela novi pojam „radioaktivnost“ kojim je opisivala tvari s navedenim svojstvima.

Pierre i Maria zajedničkim istraživanjem na rudi uraninita otkrili su dva nova elementa koja su davala veliku radioaktivnost. Nove elemente nazvali su polonij (jer je Marie rođena u Poljskoj), dok su drugi element nazvali radij (lat. radius: zraka).

Za otkrića koja su postignuli H. Becquerel, Maria i Pierre Curie, nagrađeni su Nobelovom nagradom za fiziku 1903. godine. Maria je također nagrađena Nobelovom nagradom za kemiju 1911. godine [6].

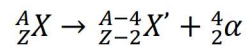
2.2. VRSTE RADIOAKTIVNOG RASPADA

Osnovni tipovi radioaktivnog raspada s kojima smo upoznati su alfa (α), beta (β) i gama (γ) raspad. U svakom od ovih raspada, s izuzetkom gama raspada, dolazi do preobrazbe elemenata, a svi ti raspadni praćeni su emisijom odgovarajućih čestica, tzv. radioaktivnim zračenjem. Gama raspad, koji je popraćen emisijom fotona (kvanta energije), ne predstavlja raspad u prva dva smisla, jer se u njemu jezgra ne mijenja ni u čemu drugom osim u energiji [4].

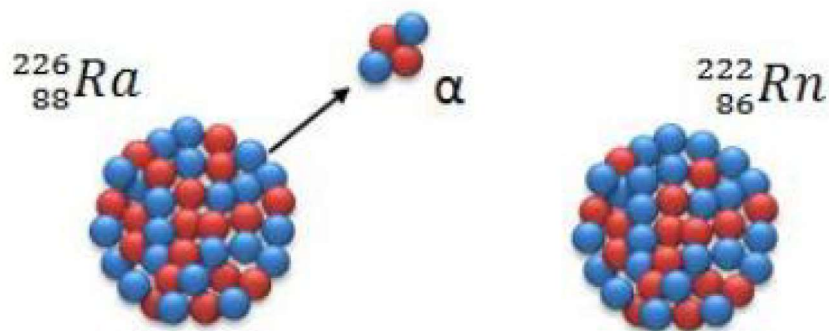
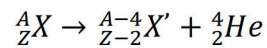
2.2.1. Alfa (α) raspad

Alfa (α) raspad je emisija alfa čestica, tj. jezgre atoma helija s 2 protona i 2 neutrona u čvrsto vezanom sustavu čija je ukupna energija veze od oko 28 MeV. Specifičan je kod teških jezgri s protonskim brojem $Z \geq 84$. Zbog svoje relativno velike mase nema probojnu moć i ima domet najviše do nekoliko centimetara u zraku. Nakon raspada, maseni broj nove atomske jezgre je smanjen za 4, a protonski broj za 2 s obzirom na jezgru koja se raspala [4].

Proces kojim zapisujemo alfa raspad je sljedeći:



tj. možemo pisati kao:



Slika 1. α raspad jezgre radija [7]

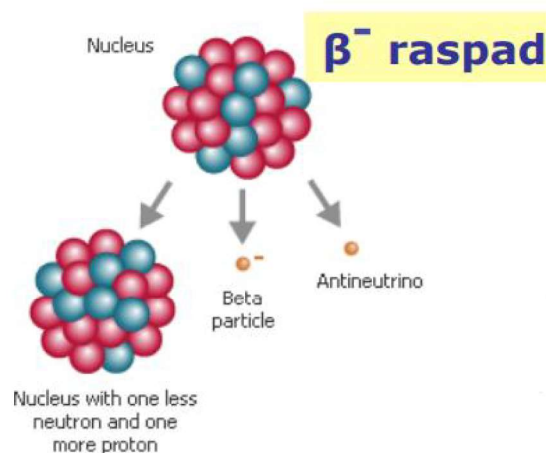
Na Slici 1. prikazan je α raspad jezgre radija, ${}^{226}_{88}Ra$ pri kojem nastaje radioaktivni plin radon, ${}^{222}_{86}Rn$.

Najveći dio energije raspada odnosi se na alfa česticu, manji dio se odnosi na jezgru potomka koja se giba. Energija zračenja tada je zapravo jednaka energiji raspada, a zračenje ima točno određenu energiju, tj. točno određeni linijski spektar. Čak i komad papira može zaustaviti alfa čestice. Stoga alfa izvori ne predstavljaju tako ozbiljnu opasnost s obzirom na to da ih sloj kože može zaustaviti. Alfa čestice koje ulaze u ljudsko tijelo su opasne (unutarnja kontaminacija ingestijom ili inhalacijom) jer alfa čestice imaju veliku moć ionizacije te dolazi do razaranja unutarnjih organa zbog velike energije alfa čestica. Alfa zračenje ima energetski raspon od 4 do 10 MeV [8][9].

2.2.2. Beta (β) raspad

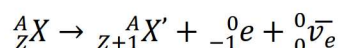
Beta (β) raspad je emisija beta čestica, odnosno elektrona. Postoje 3 vrste beta raspada, a to su beta minus (β^-) raspad, beta plus (β^+) raspad i elektronski uhvat.

β^- raspad najčešće se događa u nestabilnim jezgrama s viškom neutrona. Pri tome se neutron transformira u proton koji ostaje vezan u jezgri, dok elektron i antineutrino napuštaju jezgru. Protonski broj povećava se za 1, a maseni broj ostaje nepromijenjen [4].

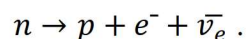


Slika 2. Prikaz β^- raspada [10]

Proces kojim zapisujemo β^- raspad je sljedeći:

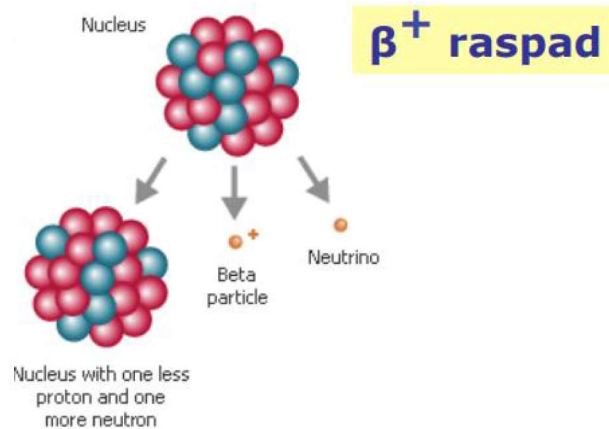


Tj. možemo pisati kao:



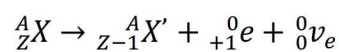
U β^+ raspadu jedan od protona raspada se u neutron, koji ostaje vezan u jezgri, pozitron koji napušta jezgru i neutrino. Kroz materiju pozitroni nailaze na slobodne elektrone i nestaju u procesu anihilacije. Tijekom zarobljavanja elektrona, obično jedan od atomskih elektrona iz K ljuske zarobi jedan proton iz jezgre. Proton postaje neutron, a iz jezgre se oslobađa samo neutrino točno određene energije. Prazna mjesta elektrona u K ljusci popunjena su jednim od

elektrona iz višeg stanja (ljuske), a fotoni X-zračenja emitirani iz atoma jedino su zračenje koje prati ovaj raspad. Redni broj izotopa je minus jedan [4].

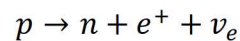


Slika 3. Prikaz β^+ raspada [10]

Proces kojim zapisujemo β^+ raspad je sljedeći:



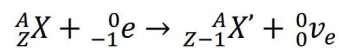
Tj. možemo pisati kao:



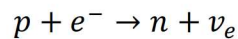
Energija kod beta raspada dijeli se između protona (neutrona), elektrona (pozitrona) i antineutrina (neutrina). Čestice ne dijele tu energiju uvijek na isti način, zbog čega energija elektrona (pozitrona) varira od nule do neke maksimalne energije za taj određeni spektar ili raspad [4].

Kod elektronskog uhvata obično jedan od elektrona iz atoma, najčešće iz K-ljuske koja je najbliža jezgri, postane zarobljen od strane protona iz jezgre. Proton se pretvara u neutron, dok iz jezgre dolazi do emisije neutrina koji posjeduje točno određenu energiju. Prazan prostor koji za sobom ostavi elektron iz K-ljuske popuni drugi elektron iz višeg stanja (ljuske), a foton x-zračenja emitiran iz atoma jedino je zračenje koje prati taj raspad [4].

Proces kojim zapisujemo elektronski uhvat je sljedeći:



Tj. možemo pisati kao:

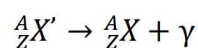


Ako proučavamo prodornost α i β zračenja, β zračenje doseže veću udaljenost u zraku, čak do nekoliko metara. S obzirom na veću prodornost, ne zaustavlja ga već tanki sloj papira kao što je slučaj kod α zračenja, ali dovoljna je aluminijska folija. Kao vanjski izvor zračenja može uzrokovati oštećenje kože i očiju [8,9] .

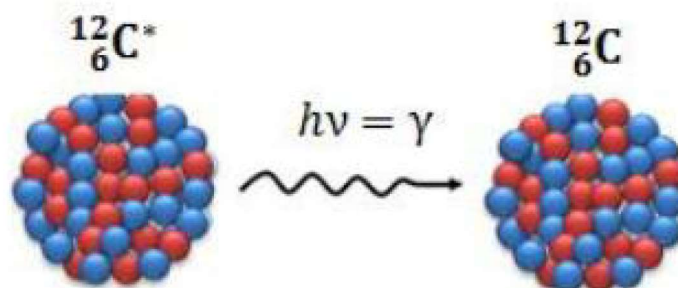
2.2.3. Gama (γ) raspad

Nakon α ili β raspada, vrlo često se dogodi da jezgra koja je doživjela radioaktivni raspad ne pređe u osnovno stanje, već ostane u jednom od svojih pobuđenih stanja. Kako bi obavila prelazak do osnovnog stanja, jezgra potomak emitira elektromagnetsko zračenje (gama fotone odgovarajuće energije). Emitirana energija iznosi upravo onoliko koliko iznosi razlika početnog i konačnog stanja u kojemu se jezgra nalazila.

Proces kojim zapisujemo γ raspad je sljedeći:

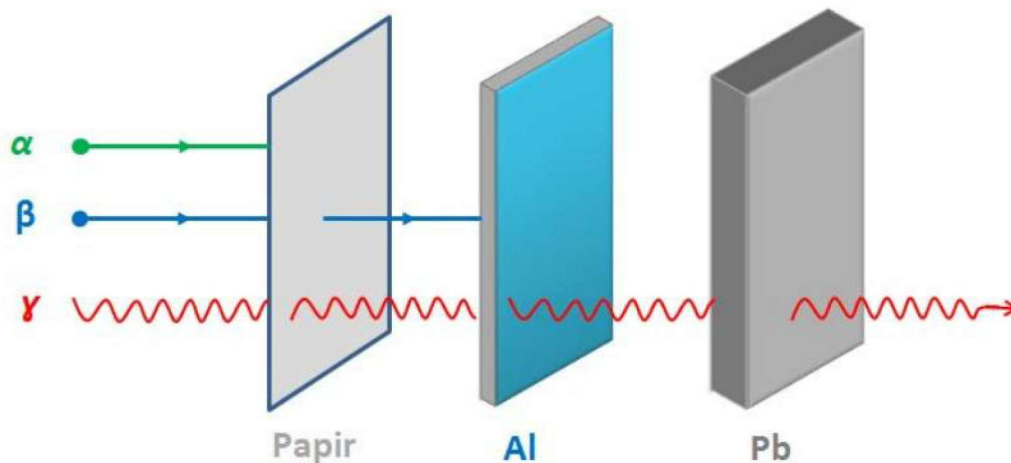


Kao što je vidljivo iz jednadžbe, maseni i protonski broj ostaju nepromijenjeni kod γ raspada. Promjene u jezgri također nisu prisutne.



Slika 4. Prikaz γ raspada [7]

Prodornost γ zračenja je vrlo velika, predstavlja opasnost i kao vanjski i kao unutarnji izvor zračenja. Kako bismo umanjili intenzitet zračenja za sto puta, potrebna nam je zaštita od olova debljine nekoliko centimetara. Na Slici 5. prikazana je prodornost alfa, beta i gama zračenja [4, 7-9] .



Slika 5. Prodornost α , β i γ zračenja kroz različite materijale [7].

2.3. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA

Radioaktivni raspad je statistički proces i ne možemo ga predvidjeti. Pomoću radioaktivnog raspada možemo računati koji broj atoma će se raspasti u određenom vremenu, ali ne možemo sa sigurnošću računati kada će se raspasti pojedinačna jezgra.

Konstanta raspada λ karakterizira radioaktivni raspad te je vrijednost veličine ista za sve atome izotopa bez obzira na vrijeme. Konstantu radioaktivnog raspada definiramo kao vjerojatnost raspada jezgre jednog atoma u jedinici vremena.

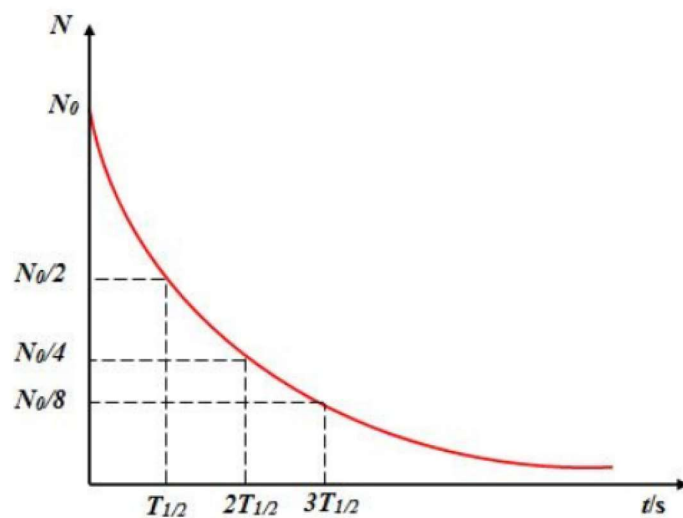
Broj neraspadnutih jezgri tijekom vremena postaje sve manji upravo zbog raspada koji se događa. Sljedećom diferencijalnom jednažbom prikazujemo kako se mijenja broj neraspadnutih jezgri ako uzimamo u obzir i konstantu raspada:

$$dN = -N\lambda dt,$$

dok rješenje zapisujemo u obliku:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

Pri čemu N_0 predstavlja početni broj jezgri prije raspada. Jednadžba koja je navedena naziva se zakon radioaktivnog raspada, a možemo je prikazati i grafički [11] :



Slika 6. Grafički prikaz radioaktivnog raspada [7]

3. OPĆENITO O RADONU

Nakon otkrića uranija, polonija, radija i torija, 1900. godine uslijedilo je otkriće petog plemenitog plina radona. Za otkriće radona zaslužan je njemački fizičar Friedrich Ernst Dorn koji je uočio da radij pri raspadanju stvara plin koji je radioaktivan i širi se zrakom. Plinu je dan naziv radon prema radiju ^{226}Ra od kojeg nastaje α raspadom [12].

3.1. FIZIKALNO-KEMIJSKA OBILJEŽJA RADONA

Radon je prirodni plemeniti plin koji lako isparava, radioaktivan je i nema boju, miris niti okus. Vrelište radona je na $-61,8^{\circ}\text{C}$, a ledište na -71°C . Gustoća radona iznosi 9,72 grama po litri, što ga čini najgušćim poznatim plinom. U usporedbi sa zrakom, radon je gušći otprilike sedam puta [12].

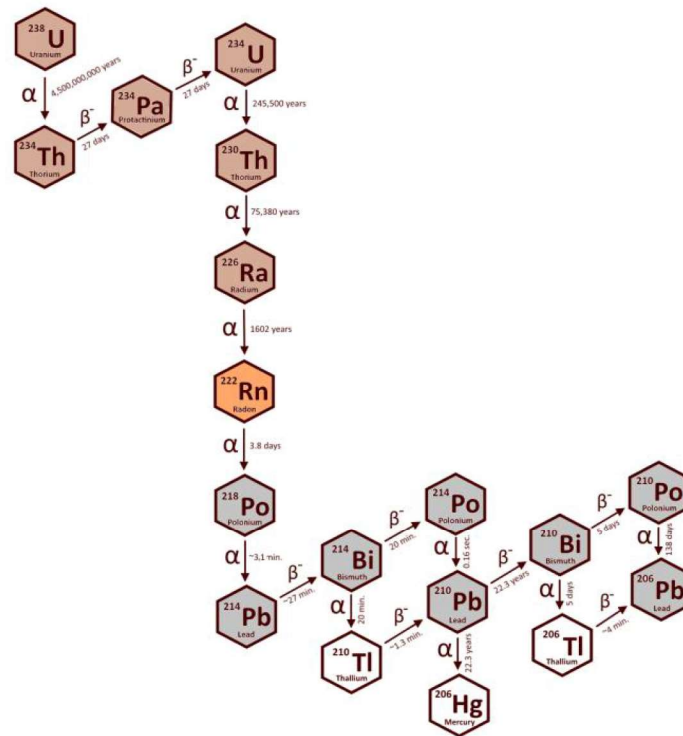
Dugo vremena smatralo se da radon ne reagira s drugim tvarima u okolini, isto kao i ostali plemeniti plinovi. 60-ih godina 19. stoljeća kemičari su uspjeli pronaći način kako spojiti plemenite plinove s drugim tvarima i to kombinirajući plinove s vrlo aktivnim elementima. Jedan od njih je fluor ^{18}F , najaktivniji kemijski element. Tako su ostvarili spoj radona i fluora, koji je nazvan radon fluorid RnF [12].

U prirodi se nalaze tri izotopa radona i svaki od njih je radioaktivan. Najpoznatiji izotop radona je ^{222}Rn . Nestabilan je te nastaje alfa raspadom radija ^{226}Ra koji dolazi iz radioaktivnog niza uranija ^{238}U . Vrijeme poluraspada radona ^{222}Rn iznosi 3,824 dana, što je poprilično velik broj ako uzimamo u obzir ostale radonove izotope aktinon ^{219}Rn i toron ^{220}Rn te njihova vremena poluraspada [13].

Tablica 1. Vrijeme poluraspada, vrste zračenja i pripadne energije izotopa radona i njihovih potomaka [14]

Jezgra	Vrijeme poluraspada	Vrste zračenja i energije (MeV)		
		α	β	γ
Radon				
²²² Rn	3,825 d	5,4897		
²¹⁸ Po	3,05 min	6,0026		
²¹⁴ Pb	26,8 min		0,67; 0,73	0,2952; 0,3520
²¹⁴ Bi	19,7 min		1,51; 1,54; 3,17; 3,27	0,6094; 1,1204; 1,7645
²¹⁴ Po	163,7 μ s	7,6869		
²¹⁰ Pb	22,3 god		0,017; 0,061	
²¹⁰ Bi	5,013 d		1,161	
²¹⁰ Po	138,38 d	5,3044		
Toron				
²²⁰ Rn	55,6 s	6,2883		
²¹⁶ Po	150 ms	6,7785		
²¹² Pb	10,64 h		0,331; 0,569	0,2386; 0,3001
²¹² Bi	60,6 min	6,0510; 6,0901	2,251	0,7271
²¹² Po	0,298 μ s	8,7844		
²⁰⁸ Tl	3,053 min		1,796; 1,280; 1,520	0,5106; 0,5831; 2,6146
Aktinon				
²¹⁹ Rn	3,96 s	6,4250; 6,5531; 6,8193		0,2711; 0,4017
²¹⁵ Po	1,78 ms	7,3136		
²¹¹ Pb	36,1 min		1,38	0,4049; 0,4270; 0,8319
²¹¹ Bi	2,14 min	6,279; 6,623		
²⁰⁷ Tl	4,77 min		1,43	0,8972

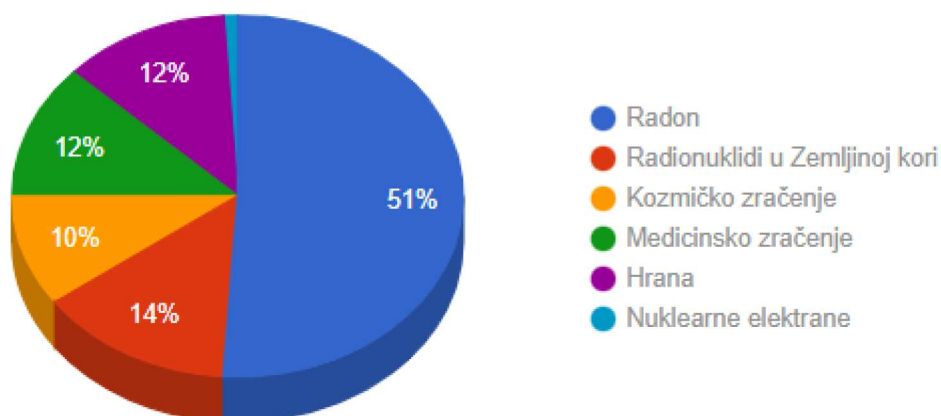
^{222}Rn svojim raspadanjem za sobom ostavlja četiri potomka koja imaju kratko vrijeme poluraspada, a to su ^{218}Po ($T_{1/2}=3,05$ min), ^{214}Pb ($T_{1/2}=26,8$ min), ^{214}Bi ($T_{1/2}=19,7$ min) i ^{214}Po ($T_{1/2}=163,7$ μs) [13]. Na Slici 7. prikazan je radioaktivni raspad uranija ^{238}U , vrijeme poluraspada i vrsta raspada potomaka.



Slika 7. Prikaz raspada uranija ^{238}U [15]

3.2. RADON U SVAKODNEVNOM OKRUŽENJU

Čovjek je svakodnevno izložen raznim vrstama zračenja prirodnog i umjetnog porijekla. Najveći udio, više od 50% zračenja dolazi od udisanja plina radona i njegovih potomaka. Nakon radona najveća koncentracija dolazi od radionuklida u Zemljinoj kori, medicinskog zračenja, hrane, kozmičkog zračenja te na posljetku u najmanjoj mjeri navedene su nuklearne elektrane. Na Slici 8. naveden je udio pojedinih komponenti zračenja na Zemlji [13,16] .



Slika 8. Izvori zračenja kojima je čovjek svakodnevno izložen [16]

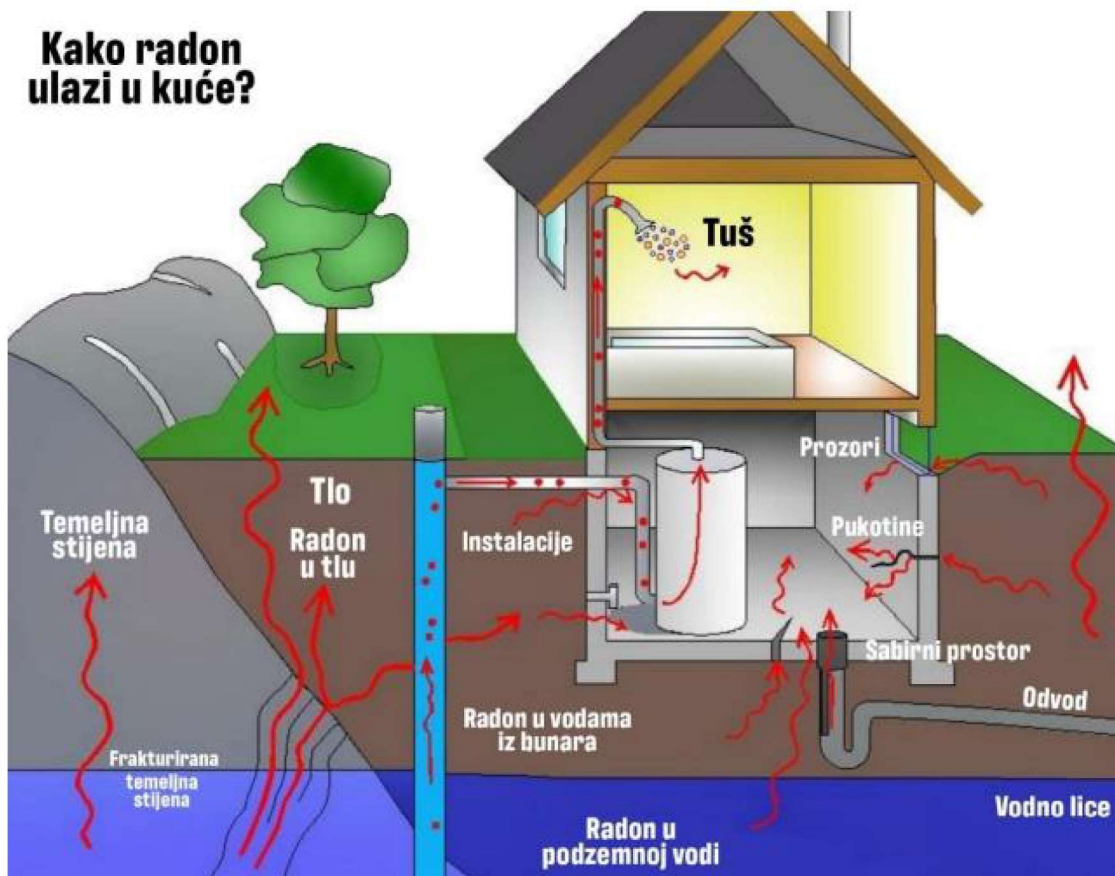
Prvobitni izvor radona su stijene i tlo te podzemni izvori vode. Drugim riječima, radon se nalazi svugdje gdje postoji radij, a koncentracija radija ovisi o koncentraciji uranija. Dakle koncentracija radona u tlu i vodi ovisi o vrsti minerala koji se nalaze u tlu ili okružuju vodenu masu (vodonosnici) [13] .

Radon do površine Zemlje dolazi iz Zemljine kore na razne načine migrirajući kroz pukotine stijena i zemlje (difuzijom, advekcijom, konvekcijom ili zajedno sa zemnim plinovima) [17] . Koliko radona će proći ovisi o raznim čimbenicima tla kao što su poroznost tla, veličina pukotina, vlažnost tla i sama veličina čestica [5] .

Dugotrajno izlaganje velikim koncentracijama radona utječe na zdravlje čovjeka. Upravo iz tih razloga provode se istraživanja i mjerenje koncentracije radona u zraku (u otvorenom i zatvorenom prostoru), u vodi (pitka voda, ali i općenito izvori voda npr. termalni izvori) te u tlu.

U zatvorenim prostorima, kao što su kućanstva radon dolazi od ^{226}Ra kroz zemljište na kojima su izgrađene kuće i zgrade. Budući da je radon težak plin, migrira kroz tlo, građevinski materijal i sustav dovoda i odvoda vode te se veže za čestice zraka. Radon se zadržava u zatvorenim prostorima, podrumima te čini opasnost za zdravlje osoba koje ondje borave. Na većim visinama stambenih prostora u pravilu, značajniji izvor radona predstavlja građevinski materijal s obzirom na to da se oni također dobivaju od raznih stijena i zemnih materijala u kojima se može nalaziti uranij odnosno radij [13,18] .

Kako radon ulazi u kuće?



Slika 9. Izvori radona u zatvorenim prostorima [19]

Istraživanja su pokazala da je plin radon, nakon konzumacije duhanskih proizvoda, drugi najčešći uzročnik karcinoma pluća kod čovjeka. Udisanjem se radon unosi u dišni sustav te se radioaktivnim raspadom radona njegovi potomci talože i emitiraju zračenje koje je najčešće u obliku alfa čestica. Uslijed toga dolazi do lokalnih oštećenja pluća, oštećenja DNA pa tako i do samog karcinoma.

Na otvorenom prostoru u zraku koncentracija radona nije velika, iznosi tek 5-15 Bq m⁻³. Koncentracija koja utječe na zdravlje uglavnom je mjerena u zatvorenim prostorima i može iznositi od nekoliko stotina pa do nekoliko tisuća Bq m⁻³ [16].

Za ovaj diplomski rad najveću važnost pridajemo proučavanju radona u vodi. Prema podacima Europske komisije za države članice Europske Unije ukupna koncentracija aktivnosti radona dozvoljena u vodama za piće iznosi 100 Bq/l [3].

U Hrvatskoj su od 2011. godine u 10 županija prikupljani uzorci vode tijekom istraživanja radona u zatvorenim prostorima, kao što su škole, vrtići i kućanstva. Aritmetička sredina gotovo 1000 uzoraka vode prikupljenih na terenu iznosila je 5 Bq/l. Minimalna izmjerena vrijednost iznosila je oko 1 Bq/l, dok je maksimalna vrijednost iznosila 154 Bq/l [20]

. Na primjeru mjerenja provedenih na području Hrvatske također je utvrđeno da je koncentracija radona promjenjiva ovisno o županijama, što je posljedica različitog geografskog položaja odnosno različitih vrsta tla. Postoje mikrolokacije sa vrlo visokim koncentracijama, nekoliko puta višim od referentne razine.

Mjerenja su provedena i u Osječko-baranjskoj županiji 2007. godine kada su uzorkovane vode u vodovodima i bunarima. Rezultati mjerenja u vodovodnim cijevima kretala su se od 0,6 do 15,9 Bq/l, dok je u bunarima koncentracija aktivnosti radona iznosila od 4,0 do 17,4 Bq/l [21] .

U sklopu kolegija Radioekologija, na Odjelu za fiziku, izvršena su mjerenja koncentracije radona u vodovodnoj vodi u gradu Osijeku na uređaju TriCarb 2900 i AlphaGUARD mjernom sustavu. Iz rezultata koji su dobiveni pomoću TriCarb-a 2900 koncentracija radona iznosi $(0,72 \pm 0,83)$ Bq/l, a što je ispod granice detekcije uređaja i tu vrijednost možemo kategorizirati kao „vrlo niska“ bez kvantifikacije samog rezultata. Ako ipak želimo kvantificirati vrijednost s većom pouzdanosti potrebno je povećati vrijeme mjerenja uzorka kako bi snizili donju granicu detekcije uređaja a time i povećali pouzdanost rezultata. AlphaGUARD mjerni sustav mjeri koncentraciju od $(1,74 \pm 1,86)$ Bq/l. No bez obzira na razliku u rezultatu, važna je činjenica da su koncentracije radona u vodovodnoj vodi grada Osijeka daleko ispod referentne vrijednosti.

Gotovo polovica ukupne doze koju čovjek primi u jednog godini od svih prirodnih izvora zračenja (2,4 mSv) dolazi upravo inhalacijom radona (1,3 mSv) [13] .

Općenito, rizik od zračenja zbog prisutnosti radona u vodi je i dalje puno manji od udisanja radona u zatvorenim prostorijama. Vodovodna voda prolazi razne metode tehnološkog čišćenja i prerade pri čemu dolazi do emanacije radona u dodiru sa zrakom. Na taj način koncentracija radona preostalog u vodi znatno je manja (rizik od zračenja iznosi manje od 5%). Kućanstva koja koriste privatne (arteške) bunare potencijalno mogu biti izloženi visokim dozama radona, osobito ako se bunari nalaze u tlu koje je bogato radijem. Korištenjem vode iz ovakvih izvora povećava se doza ingestije, a bez prethodne filtracije ili pročišćavanja, može doći do povećanja koncentracija radona unutar kuće, čime se povećava doza koju ukućani primaju inhalacijom radona i njegovih potomaka.

Područja gdje su izmjerene veće koncentracije su podzemne vode s 1-50 Bq/l i bunari gdje je koncentracija aktivnosti radona veća, a može iznositi od 100 do 50 000 Bq/l. Veće koncentracije aktivnosti radona izmjerena su na područjima gdje se nalaze stijene i tlo s velikim koncentracijama uranija i radija te njihovih izotopa. Podzemne vode prolaze kroz porozne

stijene u kojima se nakupljaju izotopi uranija i radija, skupljaju ih i prenose. Kada takve podzemne vode dođu na površinu bunara ili bilo koju vrstu izvora, koncentracija radona u vodi naglo opada kretanjem vode [22]. Također, veće koncentracije aktivnosti radona mjerene su u toplijim godišnjim dobima, najčešće u proljeće jer brži protok i veći volumen vode pokupe veću količinu radona iz stijena te nastave s bržim prijenosom [13].

Koeficijent emanacije radona govori koliki je udio ukupne količine radona koji prilikom raspada radija nastaje i oslobađa se, a koliko iznosi za različite materijale prikazano je u sljedećoj tablici (Tablica 2.).

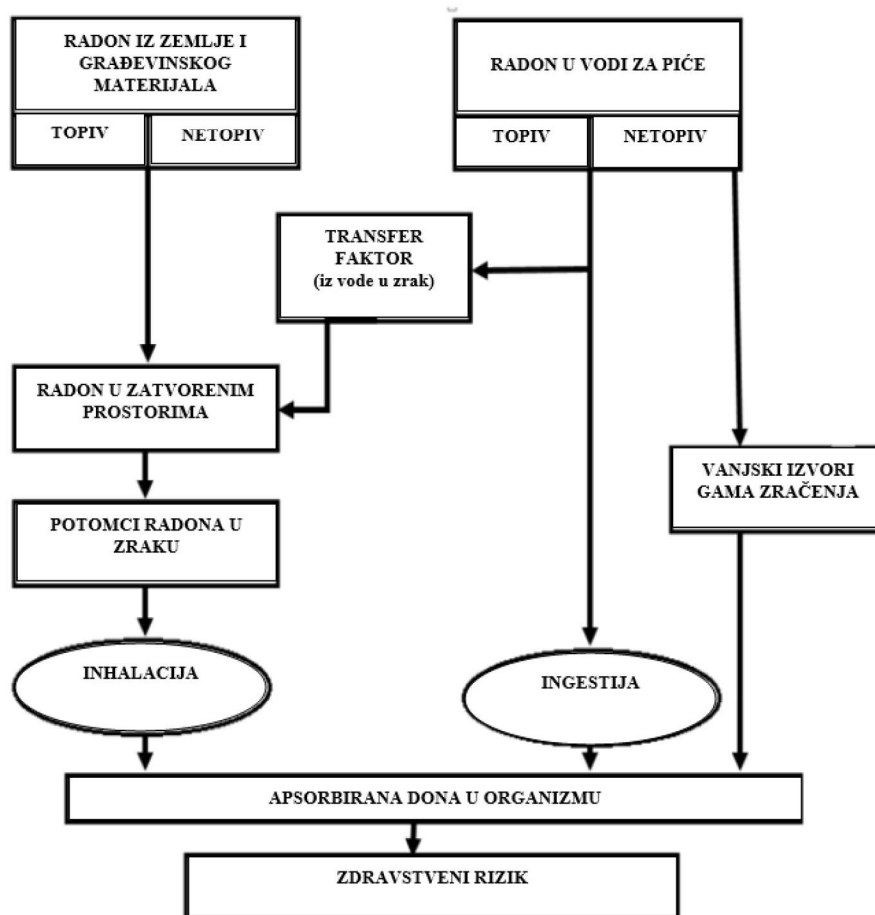
Tablica 2. Iznosi koeficijenta emanacije za razne materijale [13]

<i>VSRTA TLA</i>	<i>KOEFICIJENT EMANACIJE, e (%)</i>
<i>zemljište</i>	40
<i>stijene</i>	5
<i>granit</i>	6-33
<i>granodiorit</i>	17-40
<i>gnajs</i>	1-14

Ako bi došlo do izravnog korištenja vode s izvora, pijenjem ili korištenjem u kućanstvu, visoke koncentracije radona i dalje bi biti zadržane.

4. OPASNOST ZA ZDRAVLJE

Procjenjuje se da udisanje ^{222}Rn i njegovih potomaka uzrokuje 89% svih karcinoma uzrokovanih izlaganjem visokim koncentracijama plina radona, koji se u vodi za piće otapa u povišenim koncentracijama. Također može doći do neravnomjernog nakupljanja radonovih potomaka u dišnim putevima te dolazi do zračenja epitela bronha što u konačnici dovodi do povećanja rizika od karcinoma pluća. Primljena doza inhaliranog radona ovisi o promjeru inhaliranih čestica aerosola iz okoline. Ostalim 11% karcinoma uzrokovanih radonom dolaze uslijed unošenja vode koja sadrži povećanu razinu ^{222}Rn . Potvrđeno je da izravno unošenje ^{222}Rn i njegovih potomaka predstavlja ozbiljan rizik za razvoj karcinoma želuca te u nekim slučajevima karcinoma debelog crijeva i jetre. Radon i njegovi potomci emitiraju alfa čestice u tkivima na udaljenosti od jezgre roditelja od 40 do 70 μm , ovisno o njihovim energijama [13].



Slika 10. Raširenost radona i utjecaj na zdravlje [23]

Pri provođenju kontrole izloženosti stanovništva prirodnim izvorima zračenja, koncentracija radona u pitkim vodama relevantan je parametar u dozimetriji iz kojeg se procjenjuje doza inhalacije i doza ingestije. Efektivna doza E primljena za vrijeme unošenja gutanjem radona i njegovih potomaka odnosi se na želučano tkivo i određuje se godišnje: [13]

$$E [Sv] = K \cdot C \cdot KM \cdot t,$$

pri čemu su:

K- konverzijski faktor doze primljene ingestijom ^{222}Rn (za odrasle iznosi $10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$, dok za djecu iznosi $2 \cdot 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$),

C- koncentracija aktivnosti ^{222}Rn [Bq l^{-1}],

KM- faktor konzumacije vode, iznosi 2 [1 dan^{-1}],

t- vrijeme trajanja konzumiranja vode, uzima se 365 [dan].

Kako bi izračunali efektivnu dozu koju plućno tkivo primi godišnje inhalacijom radona prisutnog u vodi s koncentracijom aktivnosti od 1 Bq l^{-1} , uzimamo vrijednosti za faktor ravnoteže radona i potomaka 0,4 (uobičajeni omjer jezgri potomaka radona), život u prostoru računamo kao 7000 h god^{-1} , nakon toga uzimamo konverzijski faktor doze izloženosti radonu $9 \text{ nSv Bq}^{-1} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, pretpostavljajući da je omjer koncentracije radona oslobođenog iz vode u zrak te radona zadržanog u vodi isti 10^{-4} , dobivamo rezultat od $2,5 \mu\text{Sv god}^{-1}$ [13].

Dobivene rezultate možemo usporediti sa rezultatima dobivenim pomoću metode računanja ukupne doze radona u vodi prema UNSCEAR 2000. na način da se računa doza inhalacije radona oslobođenog iz slavine te doze ingestije iste te vode iz slavine. Za izmjerenu koncentraciju aktivnosti radona u vodi od 1 Bq l^{-1} tj. 10^3 Bq m^{-3} , uzimamo omjer zraka i vode 10^{-4} , život u prostoru računamo kao 7000 h god^{-1} te dobijemo za dozu inhalacije:

$$\text{Doza inhalacije} = c_w \left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) \cdot 10^{-4} \cdot 7,000 \text{ h} \cdot 0,4 \cdot 9 \text{ nSv } (\text{Bq h m}^{-3})^{-1} = 2,5 \mu\text{Sv}$$

Procjena godišnje potrošnje vode iz slavine za dojenčad, djecu i odrasle redom iznosi 100, 75 i 50 litara. Ako se uzme u obzir pretpostavka da je udio te skupine ljudi 0,05, 0,3 i 0,65 procjena godišnje potrošnje je 60 litara:

$$\text{Doza ingestije:} = c_w \left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) \cdot 60 \text{ l/year} \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-3} \text{ l}^{-1} \cdot 3,5 \text{ nSv Bq}^{-1} = 0,2 \text{ } \mu\text{Sv} [24]$$

Iz navedena dva modela i dobivenih rezultata možemo uočiti kako iznosi efektivnih doza koju osoba primi ingestijom rezultiraju jednakim iznosom od 2,5 μSv . Rezultati su isti iako problemu pristupaju na drugačiji način. Druga metoda, navedena prema UNSCEAR 2000. uzima u obzir dob osobe za koju se vrši mjerenje. Razlikuju odraslu osobu, dijete i dojenčad te različitu količinu vode koju osoba unese ovisno o starosti.

5. TEHNIKA MJERENJA RADONA U VODI

Za mjerenje koncentraciju aktivnosti radona u vodi postoji nekoliko metoda. Možemo odabrati želimo li koristiti ionizacijske komore, čvrste ili tekuće scintilacijske brojače ili gama brojače. Naravno svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke, odabire se onaj koji pruža najveće mogućnosti ovisno o potrebama [25].

LSC metoda pruža mogućnost dobivanja rezultata u dovoljno kratkom vremenu za veći broj uzoraka. Druga prednost je registriranje ^{222}Rn impulsa uz pomoć PSA (Pulse Shape Analyzer) detektora koji omogućava istovremeno registriranje alfa i beta spektra te detekciju vrlo niske alfa aktivnosti uz prisutnost visoke beta aktivnosti. Najmanja aktivnost koju uređaj može prepoznati uz PSA detektor α/β radioaktivnosti iznosi 0,04 – 0,2 Bq/l, što je puno manje od aktivnosti koja se detektira pomoću izravne LSC metode. Izravna metoda mjeri aktivnost manju od 1 Bq/l u vremenu od 20 min do 60 min. Kao što je navedeno, ova metoda ima i nedostatak, a to je da LSC metoda ima lošu rezoluciju energije [13].

Glavni izvori pogrešaka u mjerenju koncentracije radona u vodi su tehnike uzorkovanja. Uzorak mora biti reprezentativan, ispitan i ne smije doći u kontakt sa zrakom [25].

U ovom radu korišten je tekućinski scintilacijski brojač (LSC) TriCarb 2900 koji je kasnije u tekstu detaljnije opisan, kao i sama LSC metoda.

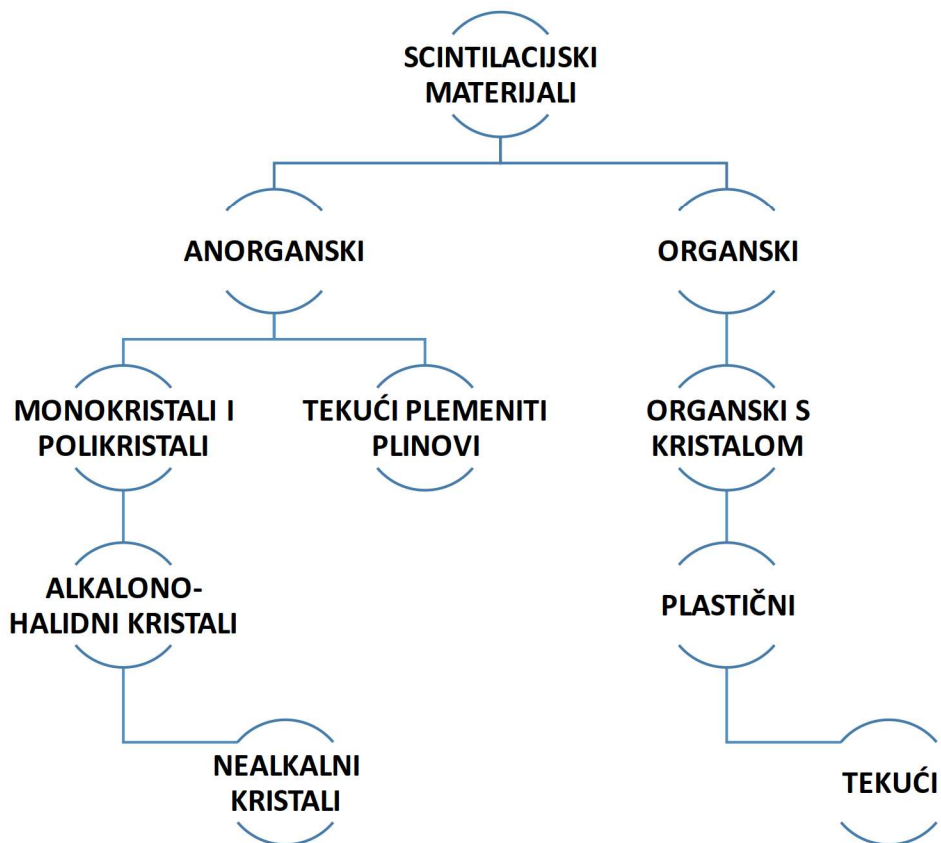
5.1. LSC METODA

Metoda tekućinskog scintilacijskog detektora bazira se na principu prepoznavanja scintilacija u testiranom uzorku, odnosno prepoznavanju i određivanju energije zračenja koja se emitira. Ovakav detektor prepoznaje alfa i beta zračenja, ali se može upotrijebiti i za analizu radionuklida koji emitiraju gama zrake, x-zrake i neutrone.

U tu svrhu koristi se tekućinski scintilacijski detektor koji se sastoji od scintilatora, fotomultiplikatorske cijevi i električnog uređaja za pojačavanje i obradu impulsa. Scintilacijski detektori koriste svjetlost za otkrivanje zračenja.

U ovakvoj vrsti detektora pojava luminiscencije jako je važna za prepoznavanje zračenja. Luminiscencija je pojava do koje dolazi kada su atomi neke tvari u pobuđenom stanju ili kada su ionizirani, a kao posljedica toga dolazi do emitiranja svjetlosti u materijalu.

Problem do kojeg se dolazi je odabir sredstva koje će biti prozirno s obzirom na valnu duljinu emitirane svjetlosti. Takva sredstva se dijele na organske i anorganske scintilatore. Organski scintilatori dolaze u kristalnom obliku (naftalen, antracen, stilben), ali se mogu koristiti i u tekućem obliku (ksilen, toulen). Anorganski scintilatori se koriste u monokristalnom obliku, od kojih je najčešći NaI, no koriste se i LiI, CsI, CsF i KI. Ovi kristali su prozirni za mali postotak (oko 0,1%) svjetla koje emitiraju, a kako bi se taj postotak povećao dodaje se mala količina nečistoća koje nazivamo aktivatorima. Najčešće se koriste organski scintilacijskih kokteli koji se skupa sa uzorkom stavljaju u viala. Kada se uzorak tj. molekule uzorka pobude emisijom zračenja, molekule scintilatora multipliciraju svjetlost (fotone) [25].



Slika 11. Scintilacijski materijali [23]

Jedna od najzastupljenijih metoda mjerenja radona je upravo LSC metoda zbog visoke topljivosti radona u organskim otapalima koji se nalaze u scintilacijskim koktelima [26].

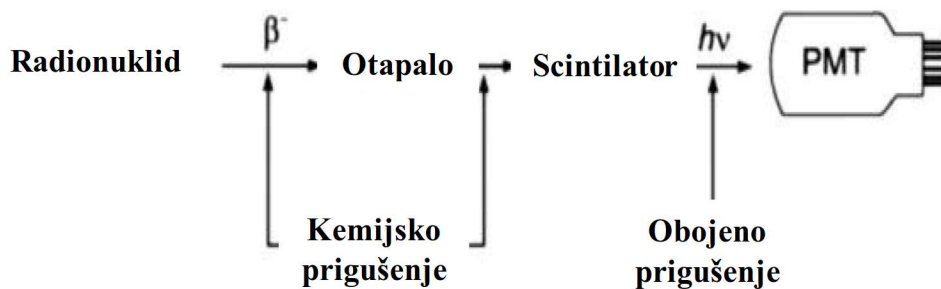
Kokteli se sastoje od aromatskih otapala s velikom gustoćom elektrona. Zbog velike gustoće scintilacijskog koktela radon se u potpunosti veže i na taj način se sprječava difuzija radona iz uzorka.

Na rezultate mjerenja mogu utjecati pozadinsko zračenje, statički elektricitet ili spektralno preklapanje, efekt zidova [25].

5.1.1. Scintilacijski proces u koktelu

Radioaktivni uzorak miješa se sa scintilacijskim koktelom u staklenoj bočici tj. viali. Scintilacijski koktel sastoji se od otapala (S) i scintilatora koji emitira fluorescentnu svjetlost (F). Udio otapala u koktelu može iznositi 60-90% ukupnog volumena koktela, a gotovo se uvijek radi o aromatičnim organskim tvarima. U ovom radu korišten je koktel UltimaGold F [27].

U interakciji s uzorkom, ionizirajuće zračenje pobuđuje molekule, proizvodeći ionske parove, slobodne radikale, sekundarne čestice i povećavajući energiju molekulama. Koncentracija pobuđenih i ioniziranih molekula ovisit će o vrsti procesa koji se događa u međudjelovanju nabijenih čestica s materijom. S obzirom na to da je koncentracija molekula otapala veća od koncentracije otopljenih molekula F u koktelu, ionizirajuće zračenje će u većini ionizirati ili pobuditi molekule otapala ($S \rightarrow S^+ + e^-$ ili $S \rightarrow S^*$). Ionizirane molekule otapala „hvataju“ slobodne elektrone i pretvaraju ih u neutralne molekule ($S^+ + e^- \rightarrow S^*$) koje prenose dio energije na druge molekule otapala ili molekule scintilatora (F) pri čemu nema zračenja ($S_1^* + S_2 \rightarrow S_1 + S_2^*$ ili $S_2^* + F \rightarrow S_2 + F^*$). Pobuđene molekule fluora iz pobuđenih prelaze na niža stanja uz emisiju UV ili vidljive plave svjetlosti s valnim duljinama od 375-430 nm ($F^* \rightarrow F + h\nu$), tako da su scintilacijski koktel i stijenke bočice prozirni. Nastali fotoni padaju na katodu, emitiraju elektrone (fotoelektrone) te dopijevaju na fotomultiplikatorsku cijev. Zadaća fotomultiplikatorske cijevi je umnažanje broja dospjelih fotoelektrona, a svjetlosni signal koji nastaje traje 5 ns. Intenzitet svjetlosti koju emitiraju otopljene molekule scintilatora u koktelu proporcionalan je s energijom radioaktivnog raspada, a broj impulsa u jedinici vremena proporcionalan je broju raspada po jedinici vremena [23].



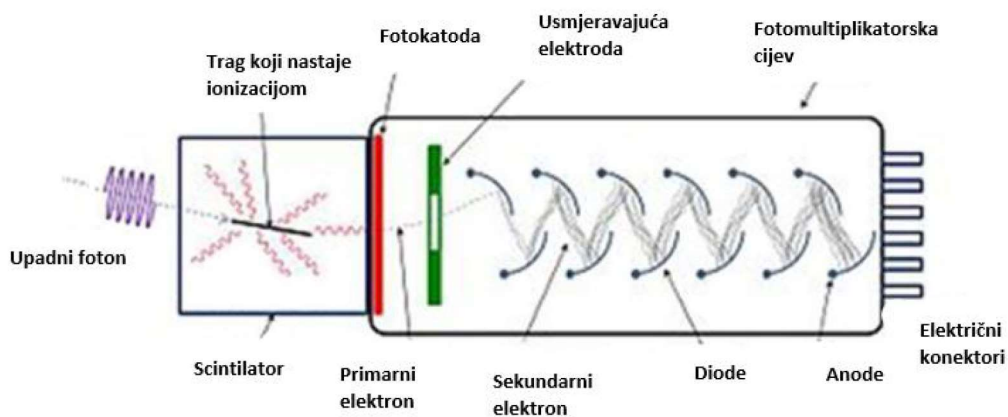
Slika 12. Proces unutar scintilacijskog koktela [28]

Zračenje koje uzorak emitira prenosi svoju energiju na molekule otapala, koje zatim energiju prenose fluoru (LSC koktel sadrži male količine aditiva fluora jer pospješuje detekciju zračenja), a pobuđene molekule fluora pri emisiji fotona prelaze u osnovno stanje.

5.1.2. Fotomultiplikator

Kako bi uspješno primijenili scintilacijske detektore u eksperimentima nuklearne fizike i fizike elementarnih čestica, potrebno je pretvoriti golim okom slabo vidljive svjetlosne impulse iz scintilatora u električne impulse kako bi ih dalje obradili u odgovarajućim elektroničkim jedinicama. Najraširenija metoda koja je danas korištena su upravo fotomultiplikatorske cijevi ili fotomultiplikatori, a spojeni su na scintilator izravno ili optičkim kablovima [29] .

Cilindrična cijev koja čini cijev fotomultiplikatora ima proziran prozor na jednom kraju koji služi za propuštanje svjetlosti iz scintilatora. Fotokatoda izrađena od metala s malim izlaznim radon emisije elektrona nalazi se ispod navedenog prozora. Emitirana svjetlost sa scintilatora pada na fotokatodu te izbacuje elektrone iz nje. Elektroni se gibaju ubrzano uslijed djelovanja električnog polja te su usmjereni prema prvoj od nekoliko (10-20) dioda smještenih u fotomultiplikatorskoj cijevi. Svaka sljedeća dioda sadrži veći potencijal od prethodne diode, a to dobivamo spajanjem niza otpornika. Elektroni se ubrzavaju te im se povećava broj, a proces se ponavlja sve do posljednje diode. Broj elektrona na posljednjoj diodi je uvećan za nekoliko redova veličine (10^7 - 10^8) [30]. Nakon posljednje diode dolazi se do anode s najvećim potencijalom, a njen zadatak je skupiti sve elektrone.



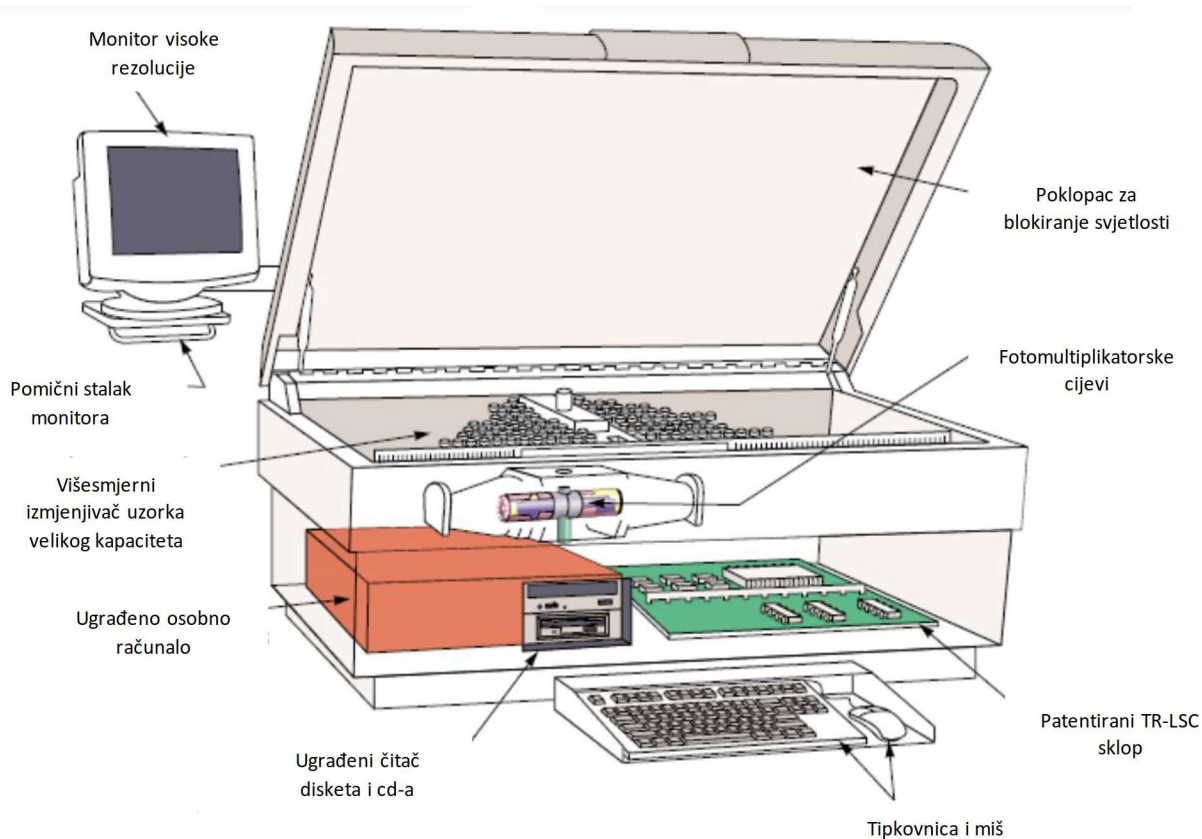
Slika 13. Shematski prikaz scintilacijskog detektora i fotomultiplikacijske cijevi [19]

Veza između scintilatora i fotomultiplikatorske cijevi mora biti takva da vanjska svjetlost ne može prodrijeti do fotokatode. Dobiveni signal na fotomultiplikatorskoj cijevi mora biti rezultat isključivo scintilacija dobivenih uslijed zračenja.

Iznos energije koju su čestice zračenjem izbacile u scintilatoru proporcionalna je količini emitirane svjetlosti koju je detektor zabilježio. Energiju detektiranih čestica možemo mjeriti scintilacijskim detektorom, ali pod uvjetom da čestice dosegnu svoju punu energiju unutar scintilatora. Energija fotona može se odrediti samo kada foton podliježe fotoelektričnom efektu unutar detektora, te na taj način predaje svoju punu energiju scintilatoru. Tada bi visina naponskog signala na izlazu fotomultiplikatora odgovarala energiji fotona [23].

5.2. TEKUĆINSKI SCINTILACIJSKI DETEKTOR TriCarb 2900

TriCarb 2900 je tekućinski scintilacijski detektor pomoću kojeg se mogu detektirati niske doze alfa, beta i gama zračenja. Povezan je s računalom i na taj način ima mogućnost automatskog obrađivanja, provjeravanja i vrednovanja podataka i dobivenih rezultata [25].



Slika 14. Prikaz tekućinskog scintilacijskog detektora TriCarb 2900

Budući da se rad detektora TriCarb 2900 temelji na scintilacijama te koristi optičke senzore, nužno je korištenje uređaja u zatvorenom prostoru kako bi izbjegli utjecaj sunčeve svjetlosti. Sunčeva svjetlost može izazvati fluorescenciju u uzorku što bi dovelo do krivih rezultata pri mjerenju. Potrebno voditi računa i da se uređaj koristi na dovoljnoj udaljenosti od ostalih izvora zračenja koji bi također mogli utjecati na rad ovog detektora [25].

TriCarb 2900 sadrži dvije fotomultiplikatorske cijevi visokih performansi spojene jedna nasuprot druge u reflektirajućoj optičkoj komori koja ne propušta svjetlo. Detektori se nalaze na stražnjoj strani uređaja ispod nosača uzoraka (kazete), a okruženi su slojem olova debljine minimalno 5 cm jer olovo sprječava djelovanje pozadinskog zračenja na uzorak.

Plastični nosači viala nazivaju se kazete i omogućavaju pomicanje uzoraka u uređaju (Slika 15.). Kazeta može sadržavati 12 bočica po 20 ml ili 18 bočica od 4-7 ml, dok uređaj može analizirati 408 bočica volumena 20 ml, odnosno 720 manjih bočica od 4-7 ml.



Slika 15. Kazeta sa vialama [27]

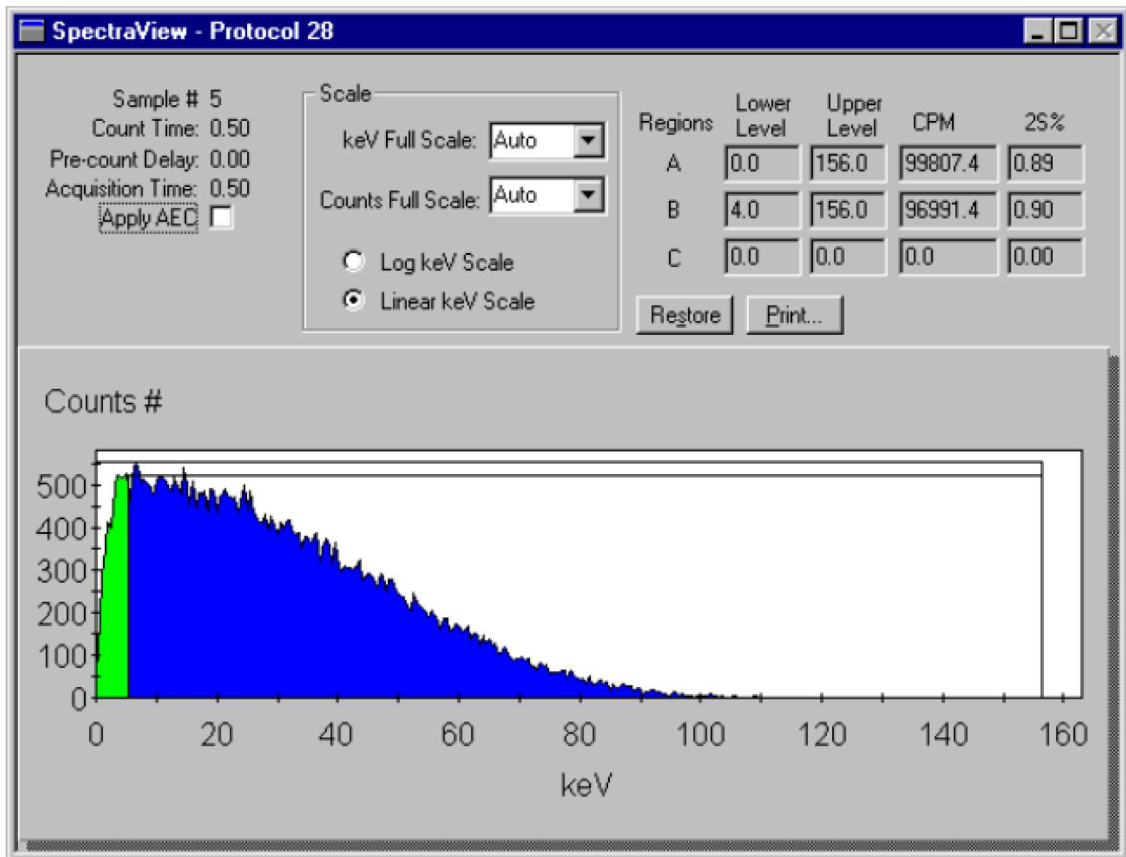
Na kazeti se nalazi zastavica protokola (Slika 16.) koja služi za prepoznavanje protokola i uvjeta rada koji su zadani u programu uređaja. Zastavica mora biti postavljena na početku kazete, potpuno lijevo kako bi uređaj prepoznao nove uzorke za analizu. Svaka kazeta sadrži vlastitu oznaku tj. identifikacijski broj (ID) koji se nalazi na samom kraju, tj. u krajnjem desnom položaju. Uređaj automatski očitava protokol i ID držača kako bi osigurao točnu provedbu zadatka.



Slika 16. Zastavica protokola [27]

Uređaj automatski pomiče uzorke koji su smješteni u kazeti na početno mjesto te ih učitava jedan po jedan u detektor za brojanje. Kada je brojanje jednog uzorka završeno, uzorak se automatski izbacuje, a uvlači se sljedeći. Kazeta se unutar uređaja pomiče u smjeru prema naprijed, u smjeru suprotnom od kazaljke na satu [31].

Softver koji se koristi za proučavanje spektra uzorka je QuantaSmart koji omogućuje prikaz 2D spektra analiziranog uzorka. Povratne informacije koje uređaj pruža su broj događaja zabilježenih u uzorku kao i energija pri kojoj su ti događaji zabilježeni, a mogu se izraziti u linearnim i logaritamskim skalama [25]. Uređaj se također može spojiti i na internetsku mrežu [32].



Slika 17. Prozor softvera QuantaSmart sa prikazom 2D spektra [31]

5.3. KALIBRACIJA UREĐAJA

Kako bi učinkovitost uređaja bila osigurana, potrebno je provesti kalibraciju uređaja pomoću EPA (Environmental Protection Agency) 913 protokola koristeći poznatu aktivnost radona. U ovom slučaju korišteno je 100 ml radija poznate aktivnosti. Uzorak nakon pripremanja mora stajati 30 dana kako bi postigao sekularnu ravnotežu radija i radona. Nakon toga se u posudu od 100 ml ulije točno izmjerenih 20 ml destilirane vode i 0,5 ml koncentrirane dušične kiseline (HNO_3). Analitičkom vagom se odredi početna masa smjese. U smjesu se pipetom dodaje pripremljeni standard radija. Analitičkom vagom se ponovno određuje masa smjese, a nakon toga se dodaje destilirana voda kako bi razrijedili otopinu sve do 100 ml. Dobivena otopina se sada pipetira u 3 staklene vijale. U svaku se pipetom usipa 10 ml scintilacijskog koktela i 10 ml otopine te se mjerenja vrše u nekoliko ciklusa, svaki u trajanju od 60 minuta, nakon što su uzorci odstajali u mraku barem 3 sata kako bi eliminirali mogućnost eventualnih fotoluminiscentnih reakcija [33].

Pozadinski uzorak također je pripremljen s 10 ml destilirane vode i 10 ml scintilacijskog koktela. Uzorak je mjereno za kalibracijske potrebe sustava, a kasnije se koriste i za sve uzorke vode za određivanje koncentracije radona [13].

Kalibracijski faktor (CF) za navedeni uređaj iznosi ($275 \pm 2,33$) cpm/Bq, a dobiven je iz sljedeće relacije:

$$CF = \frac{S - B}{C \cdot V}$$

Pri čemu je:

S – broj impulsa u standardu (min^{-1}),

B – broj događaja u pozadinskom zračenju (min^{-1}),

C – koncentracija aktivnosti kalibriranog standarda ^{226}Ra i ^{222}Ra (Bq l^{-1}),

V – volumen standarda (l) [33].

Iznos kalibracijskog faktora dobiven pomoću EPA protokola potvrđen je i s ISO (International Organization for Standardization) standardom za određivanje radona u vodi.

5.4. UZORKOVANJE VODE I PRIPREMA UZORKA

Tehnike uzorkovanja često su glavni izvor pogreške u mjerenjima koncentracije radona u vodi, zato je precizno uzorkovanje ključni čimbenik o kojem ovisi ispravnost rezultata. Uzorak vode mora biti reprezentativan i ne smije doći u kontakt sa zrakom. Najispravniji način prikupljanja uzorka je korištenjem staklene bočice i teflonskog čepa kroz koji radon ne može difundirati. Za pouzdanost i točnost rezultata mjerenja potrebno je posebno paziti da se boca u kojoj se nalazi uzorak vode napuni točno do vrha, bez prisutnosti zraka, kako bi spriječili emanaciju radona. Kako bi to uspješno izbjegli, najbolje je bocu držati pod što jačim mlazom vode i zatvoriti je kada se prelije.

Važno je obratiti pozornost na vrijeme uzorkovanja jer predstavlja točno početno vrijeme kada je započeo raspad radona, a na temelju kojeg se radi korekcija u rezultatima za raspad. Uzorak je potrebno analizirati unutar tri dana od primitka u laboratorij. Štrcaljke i pipete s uskim mlaznicama se ne preporučuju tijekom pripreme uzorka zbog turbulencija, eventualnog stvaranja vakuuma ili promjene tlaka što utječe na koncentraciju radona u uzorku. Kako bi smanjili gubitke radona koriste se pipete sa širim nastavcima.

U ovom radu korišten je dvofazni uzorak, a za pripremu je bilo potrebno izmjeriti 10 ml otopine i 10 ml scintilacijskog koktela koji se usipaju u staklenu vialu od 20 ml. Za vrijeme pipetiranja, dok je boca s uzorkom otvorena i izložena zraku nekoliko sekundi ne predstavlja značajan utjecaj na emanaciju radona. Budući da radon ima puno veći afinitet prema organskoj fazi od vode, radon će prijeći iz vode u koktel te će se vezati za njega. Razni eksperimenti su pokazali kako je ovako pripremljen uzorak stabilan duže vrijeme te da u uzorcima nema emisije plina radona zbog korištenja staklenih viala [13].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Kontrola kvalitete (QC) tehnička je aktivnost mjerenja svojstava i performansi procesa, predmeta ili usluge prema definiranim standardima kako bi se potvrdilo da su u skladu s utvrđenim specifikacijama i dokumentacijom [34]. Provodi se unutar laboratorija za mjerenje radona te se strogo preporučuje kako bi se osigurala pouzdanost mjerenja radona [35].

U ovom radu proveden je protokol za kontrolu kvalitete za određivanje koncentracije radona u vodi, a detaljniji opis i postupci nalaze se u sljedećem odjeljku.

6.1. POSTUPCI MJERENJA I PRIPREMANJE UZORKA

Prije provedenog uzorkovanja, standardu specifične aktivnosti $A=0,373 \text{ Bq ml}^{-1}$ i volumena 100 ml dodali smo destiliranu vodu do volumena 500 ml. Na taj način dobivena je smjesa aktivnosti $0,0746 \text{ Bq ml}^{-1}$. Nakon toga dobivenoj smjesi dodali smo destiliranu vodu do vrha posude, ukupno 576 ml te dobili aktivnost od $0,0648 \text{ Bq ml}^{-1}$. Nastalu smjesu ostavili smo da stoji 30 dana kako bi se uspostavila sekularna ravnoteža između radona i radija.

Nakon uspostavljene sekularne ravnoteže na red dolazi pripremanje uzoraka. Provedeno je četiri vrste ispitivanja, a to su ispitivanja ovisnosti temperature skladištenja uzorka, ovisnost amplitude mućkana uzorka i koktela u viali, vrijeme mućkanja uzorka i koktela te ekstrakcija uzorka. Za svako ispitivanje, osim ekstrakcije, pripremljen je uzorak u staklenoj viali od 20 ml, a u svaku je pipetom usipano 10 ml scintilacijskog koktela UltimaGold F i 10 ml razrijeđenog standarda aktivnosti $0,0648 \text{ Bq ml}^{-1}$. Viale označimo i nakon što su uzorci pripremljeni, redom su postavljeni u uređaj TriCarb 2900 na mjerenje, a u postavkama programa zadali smo vrijeme mjerenja od 60 minuta za svaki uzorak.

Kada uređaj završi s mjerenjem, rezultati su obrađeni kao broj događaja u jednoj minuti (cpm), a prema navedenoj relaciji preračunavamo ih koncentraciju aktivnosti radona u vodi odnosno broj radioaktivnih raspada u litri (Bq l^{-1}):

$$c \left(\frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right) = \frac{G - B}{CF \cdot D \cdot V}$$

Pri čemu je:

G - broj događaja u uzorku (cpm),

B - broj događaja u pozadinskom zračenju (cpm),

CF - kalibracijski faktor (cpm/Bq),

D - faktor korekcije s obzirom na vrijeme poluraspada ($e^{-\lambda t}$),

V - volumen uzorka (l).

Također računamo dvostruku standardnu devijaciju prema sljedećoj formuli:

$$2\sigma = \frac{2 \left(\frac{G}{T_G} \frac{B}{T_B} \right)^{\frac{1}{2}}}{CF \cdot D \cdot V}$$

Pri čemu je:

T_G - vrijeme mjerenja uzorka

T_B - vrijeme mjerenja pozadinskog zračenja (background)

6.2. REZULTATI MJERENJA I STATISTIČKA OBRADA PODATAKA

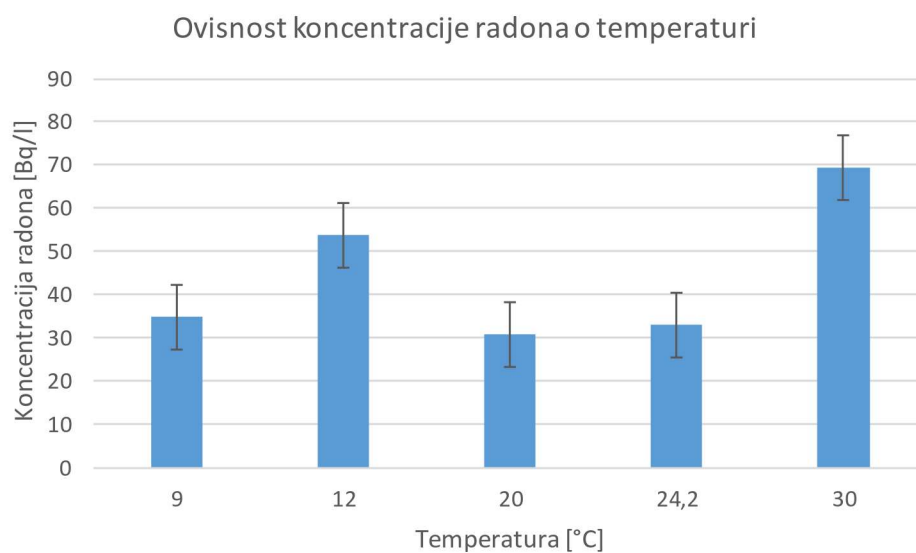
Kako bi došli do točnih zaključaka o ovisnosti koncentracije radona na temelju dobivenih rezultata provedena je statistička obrada podataka u programu Microsoft Excel. Prije provođenja statističkih testova nužno je provjeriti jesu li vrijednosti u skladu s normalnom raspodjelom (razdiobom) što smo potvrdili pomoću statističke analize u Microsoft Excelu. Jedan od testova koji je korišten je statistički t-test za ovisne varijable. Za provođenje ove vrste testa potrebno je prvo definirati nul-hipotezu H_0 koja govori da ne postoji statistički značajna razlika između mjerenih varijabli. Ukoliko je rezultat p vrijednosti $p > 0,05$ prihvaćamo H_0 i zaključujemo da ne postoji značajna razlika između mjerenih varijabli. No ukoliko je dobiveni rezultat $p < 0,05$ nul-hipoteza se odbacuje i prihvaćamo alternativnu hipotezu H_1 , tj. možemo sa 95% sigurnosti tvrditi da vrijedi H_1 , a to je da postoji značajna razlika između mjerenih varijabli. Druga vrsta testa koja je provedena je hi-kvadrat (χ^2) test koji se koristi za testiranje nezavisnosti dviju varijabli. U sljedećim tablicama navedeni su rezultati t-testa i χ^2 testa za sve vrste mjerenja koja su provedena u ovom diplomskom radu.

6.2.1. Ovisnost temperature skladištenja uzorka

Ispitivanje ovisnosti temperature skladištenja uzorka proveli smo 7. srpnja 2021. godine tako da smo koktel i uzorak nekoliko dana ranije pohranili u hladnjak na temperaturu $9\text{ }^\circ\text{C}$ i na sobnu temperaturu od $30\text{ }^\circ\text{C}$. Kombiniranjem koktela i uzorka odlučili smo provesti mjerenje za 5 različitih temperatura. Volumen svih uzoraka iznosi 0,1 litra, background iznosi 36,2 count/min, a vrijeme mjerenja uzorka i koktela iznosi 60 minuta. Svaki uzorak je mućkan 60 sekundi, a kombinacije različitih temperatura koktela i uzorka kao i rezultati mjerenja navedeni su u Tablici 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti radona u ovisnosti o temperaturi

<i>UZORAK</i>	<i>AVERAGE</i> <i>G(count/min)</i>	<i>c</i> <i>(Bq/l)</i>	<i>2σ</i> <i>(Bq/l)</i>
$T_K(9\text{ }^{\circ}\text{C})+T_U(9\text{ }^{\circ}\text{C})=9\text{ }^{\circ}\text{C}$	132	34,8	1,16
$12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ohlađeno nakon mućkanja)	184	53,8	1,32
$T_K(20\text{ }^{\circ}\text{C})+T_U(20\text{ }^{\circ}\text{C})=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	121	30,8	1,12
$T_K(30\text{ }^{\circ}\text{C})+T_U(12\text{ }^{\circ}\text{C})=24,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	127	33,02	1,14
$T_K(30\text{ }^{\circ}\text{C})+T_U(30\text{ }^{\circ}\text{C})=30\text{ }^{\circ}\text{C}$	227	69,4	1,45



Slika 18. Grafički prikaz rezultata dobivenih mjerenjem koncentracije aktivnosti radona u ovisnosti o temperaturi

Tablica 4. Rezultati t-testa za ovisnost koncentracije radona o temperaturi

	<i>Temperatura</i>	<i>Koncentracija radona</i>
<i>Mean</i>	19,04	44,5
<i>Variance</i>	74,5	279,05
<i>Observations</i>	5,00	5,00
<i>Pearson Correlation</i>	0,403	
<i>Hypothesized Mean Difference</i>	0,00	
<i>df</i>	4,00	
<i>t Stat</i>	-3,68	
<i>P(T<=t) one-tail</i>	0,0106	
<i>t Critical one-tail</i>	2,13	
<i>P(T<=t) two-tail</i>	0,0213	
<i>t Critical two-tail</i>	2,78	

Iz navedenih rezultata statističkog t-testa možemo vidjeti da je dobivena vrijednost $p=0,0213$ manja od 0,05 što nam govori da se nul-hipoteza odbacuje, točnije govori nam da postoji statistički značajna razlika za mjerenja koncentracije radona pri različitim temperaturama.

6.2.2. Ovisnost amplitude mućkanja uzorka i koktela u viali

Kako bi odredili postoji li značajna razlika pri mjerenju koncentracije radona ovisno o amplitudi mućkanja pripremili smo tri uzorka koja su tri različite osobe pipetirale i zatim mućkale u istom vremenskom periodu od 60 sekundi. Rezultati su prikazani u Tablici 5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti radona u ovisnosti o amplitudi mućkanja uzorka i koktela

<i>UZORAK</i>	<i>AVERAGE</i> <i>G(count/min)</i>	<i>c (Bq/l)</i>	<i>2σ (Bq/l)</i>
<i>OSOBA 1</i>	218	65,9	1,42
<i>OSOBA 2</i>	209	62,8	1,40
<i>OSOBA 3</i>	211	63,4	1,40

Tablica 6. Rezultati hi-kvadrat testa za ovisnost koncentracije radona o amplitudi mućkanja

<i>Osoba</i>	<i>(Observed)</i> <i>Koncentracija radona</i>	<i>Expected</i>	<i>(O-E)</i>	<i>(O-E)²</i>	<i>(O-E)²/E</i>
1	65,9	64,1	1,88	3,53	0,0552
2	62,8	64,1	-1,21	1,46	0,0229
3	63,4	64,1	-0,670	0,449	0,00701
<i>Ukupno</i>	192	192			
<i>Broj kategorija</i>	3			χ^2	0,0850

Za ovisnost koncentracije radona o amplitudi mućkanja koristili smo hi-kvadrat test u Microsoft Excelu prema navedenoj formuli. Rezultat koji smo dobili iznosi 0,0850 što je veće od 0,05 pa na razini značajnosti 0,05 prihvaćamo H_0 , tj. ne možemo tvrditi da koncentracija radona ovisi o amplitudi mućkanja uzorka.

Formula pomoću koje smo računali hi-kvadrat test:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i},$$

pri čemu je:

O_i – Promatrani uzorak,

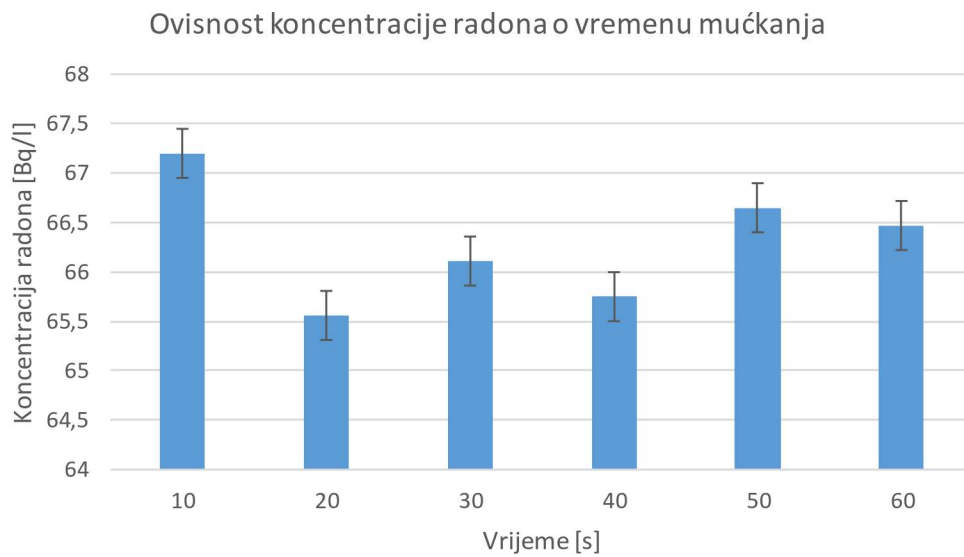
E_i – Očekivani ishod.

6.2.3. Vrijeme mućkanja uzorka i koktela

Obično se za vrijeme mućkanja uzima vrijeme od 60 sekundi, no odlučili smo provesti mjerenje kako bismo pokazali može li se jednako efikasno odraditi mućkanje i u kraćem vremenskom intervalu. Za primjer smo uzeli vrijeme od 10 sekundi pa sve do 60 sekundi u razmaku po 10. Amplituda mućkanja je stalna te su rezultati prikazani u Tablici 7.

Tablica 7. Rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti radona u ovisnosti o vremenu mućkanja uzorka i koktela

<i>UZORAK</i>	<i>AVERAGE</i> <i>G(count/min)</i>	<i>c (Bq/l)</i>	<i>2σ (Bq/l)</i>
10 s	221	67,2	1,43
20 s	217	65,6	1,42
30 s	218	66,1	1,42
40 s	217	65,8	1,42
50 s	220	66,7	1,43
60 s	220	66,5	1,43



Slika 19. Grafički prikaz rezultata dobivenih mjerenjem koncentracije aktivnosti radona u ovisnosti o vremenu mućkanja uzorka

Tablica 8. Rezultati t-testa za ovisnost koncentracije radona i vremenu mućkanja

	<i>Koncentracija radona</i>	<i>Vrijeme</i>
<i>Mean</i>	66,3	35,0
<i>Variance</i>	0,369	350
<i>Observations</i>	6,00	6
<i>Hypothesized Mean Difference</i>	0,00	
<i>df</i>	5,00	
<i>t Stat</i>	4,09	
<i>P(T<=t) one-tail</i>	0,00470	
<i>t Critical one-tail</i>	2,02	
<i>P(T<=t) two-tail</i>	0,00940	
<i>t Critical two-tail</i>	2,57	

Za ovisnost koncentracije radona o vremenu mućkanja uzorka dobili smo vrijednost $p=0,00940$ što je manje od 0,05 te se H_0 odbacuje tj. možemo reći da postoji značajna statistička razlika za koncentraciju radona s obzirom na različito vrijeme mućkanja uzorka.

6.2.4. Ekstrakcija uzorka

Pomoću ekstrakcije uzorka odlučili smo provjeriti koliko radona ostane u uzorku, odnosno koliko radona pređe u koktel prilikom mućkanja. Način na koji smo proveli to mjerenje je da smo uzorak i koktel pripremili kao i za sva ostala mjerenja, te smo ga usipali u ljevak za ekstrakciju. Nakon što smo kratko ostavili da se smjesa uzorka i koktela ponovno razdvoji, kroz ljevak smo ispustili uzorak i usipali ga u novi koktel u vali, a sami koktel smo stavili na mjerenje. Uzorak s novim koktelom smo stavili u ljevak te ponovili postupak sve skupa tri puta. Rezultati ovog mjerenja prikazani su u Tablici 9.

Tablica 9. Rezultati mjerenja za ekstrakciju uzorka

<i>UZORAK</i>	<i>AVERAGE</i> <i>G(count/min)</i>	<i>c (Bq/l)</i>	<i>2σ (Bq/l)</i>
1. <i>EKSTRAKCIJA</i>	82,0	16,7	0,970
2. <i>EKSTRAKCIJA</i>	40,0	1,38	0,780
3. <i>EKSTRAKCIJA</i>	48,0	4,29	0,820

Tablica 10. Rezultati t-testa za efikasnost ekstrakcije uzorka

	<i>Koncentracija radona</i>	<i>Broj ekstrakcija</i>
<i>Mean</i>	7,44	2
<i>Variance</i>	65,7	1
<i>Observations</i>	3,00	3
<i>Hypothesized Mean Difference</i>	4,29	
<i>df</i>	2,00	
<i>t Stat</i>	0,244	
<i>P(T<=t) one-tail</i>	0,415	
<i>t Critical one-tail</i>	2,92	
<i>P(T<=t) two-tail</i>	0,830	
<i>t Critical two-tail</i>	4,30	

Posljednji test koji smo proveli je također t-test s rezultatom $p=0,415$. Budući da je dobiveni rezultat veći od 0,05 prihvaćamo početnu hipotezu H_0 koja govori da nema smisla koristiti višestruku ekstrakciju uzorka, već je prilikom prve ekstrakcije većina radona prešla u koktel.

7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedena su četiri različita mjerenja u svrhu kontrole kvalitete za mjerenja radona u vodi, a to su ovisnost temperature skladištenja uzorka, ovisnost amplituda mućkanja uzorka i koktela u viali, vrijeme mućkanja uzorka i koktela te na kraju ekstrakcija uzorka. Sva mjerenja provedena su na tekućinskom scintilacijskom detektoru TriCarb 2900.

Rezultati koji su dobiveni u programu detektora obrađeni su i analizirani pomoću statističke analize podataka u programu Excel. Provedena je provjera izmjerenih vrijednosti i zaključeno je da podaci zadovoljavaju normalnu razdiobu što je bilo nužno za odabir statističkih testova pomoću kojih se računala statistička značajnost. Korišteni su statistički t-test i hi-kvadrat (χ^2) test.

Prvo mjerenje koje je provedeno je ovisnost koncentracije radona o temperaturi skladištenja uzorka i koktela. Na temelju dobivenih rezultata pomoću statističkog t-testa zaključeno je da postoji statistički značajna razlika tj. temperatura skladištenja utječe na rezultate mjerenja koncentracije radona. Pri nižim temperaturama zabilježene su veće koncentracije radona, iz čega slijedi preporuka da se uzorci za mjerenje koncentracije radona čuvaju na nižim temperaturama kako bi se ostvarili što kvalitetniji rezultati.

Sljedeće mjerenje je ovisnost koncentracije radona o amplitudi mućkanja uzorka koju su provele tri različite osobe. Ovo ispitivanje je provedeno pomoću χ^2 testa, a rezultat nam je pokazao da ne postoji statistički značajna razlika između pojedinih mjerenja, odnosno rezultat ne ovisi o amplitudi kojom se uzorak mućka.

Ovisnost koncentracije radona o vremenu mućkanja provedeno je pomoću statističkog t-testa, a rezultat ispitivanja pokazuje da postoji statistički značajna razlika u vremenu koje je potrebno izdvojiti za mućkanje uzorka.

Posljednje mjerenje koje je provedeno je ekstrakcija uzorka. Zanimalo nas je koliko uspješno koktel „upije“ radon u sebe te ga zadrži, tj. koliko radona ostane u uzorku. Rezultat pokazuje da nema potrebe provoditi višestruku ekstrakciju uzorka, većina radona se nakon prvog mućkanja zadrži u koktelu, a tek mali broj radona ostane u uzorku.

8. LITERATURA

- [1] Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios J M, Baysson H, Bochicchio F et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies BMJ 2005
- [2] ENHIS, *Radon levels in dwellings* (2009). Dostupno na: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/97053/4.6_-RPG4_Rad_Ex1-ed2010_editedViv_layouted.pdf [8.srpnja 2022.]
- [3] NN 118/2018 (27.12.2018), Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost: *Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. - 2024.* Dostupno na: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cro207992.pdf> [16. srpnja 2022.]
- [4] M. Nikčević, T. Anđelić (2011) *Radioaktivnost i jonizujuća zračenja, detekcija, dozimetrija i zaštita od jonizujućeg zračenja*; Podgorica.
- [5] Lakatoš R. (2019) *Primena i razvoj metoda za određivanje radona i torona u zemištu i vazduhu radi procene radonskog potencijala*. Doktorska disertacija. Novi Sad: Sveučilište u Novom Sadu; Prirodoslovno - matematički fakultet, Odjel za fiziku
- [6] Faj, Z. (1999) *Pregled povijesti fizike*, Drugo dopunjeno izdanje. Osijek; Sveučilište J.J.Strossmayera, Pedagoški fakultet u Osijeku.
- [7] Dresto – Alač B. *Radioaktivnost. Primjena u medicini*. Dostupno na: https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost_Primjena%20u%20medicini_povjerenstvo_Z.pdf [10. kolovoza 2022.]
- [8] *Radioaktivnost*. Dostupno na: https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/radioaktivnost_7/ [8.srpnja 2022.]
- [9] Jovanović T., Stojanović M. (2018). *Radioaktivni izotopi kao sastavni dio radiofarmaceutika*. Medicinski fakultet Niš, Srbija.
- [10] *Nuklearni beta raspad*, PMF Zagreb. Dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/BETA_raspad_NP.pdf [8.kolovoza 2022.]
- [11] Vladimir Knapp (1977.), *Uvod u nuklearnu fiziku*, Sveučilište u Zagrebu.

- [12] Chemistry Explained – Radon. Dostupno na: <http://www.chemistryexplained.com/elements/P-T/Radon.html> [10. srpnja 2022.]
- [13] Stojković I. (2015), *Optimizacija tečnog scintilacionog spektrometra za ispitivanje alfa i beta emitera u vodama*. Doktorska disertacija. Novi Sad: Sveučilište u Novom Sadu; Prirodoslovno - matematički fakultet, Odjel za fiziku
- [14] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A.H. Wapstra. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. 2004. ffin2p3-00020241
- [15] Gorenc, J. (2018). *Radon in njegovi potomci*. Doktorska disertacija. Ljubljana: Sveučilište u Ljubljani; Pedagoški fakultet u Ljubljani.
- [16] Ravnateljstvo civilne zaštite – sektor za radiološku i nuklearnu sigurnost, *O radonu*. Dostupno na: <http://radon.civilna-zastita.hr/o-radonu/> [10. srpnja 2022.]
- [17] Radolić V., Miklavčić I., Poje M., Stanić D., Vuković B. (2013). *Radon Levels in Manita Peć cave (Croatian NP Paklenica) and Assessment of Effective Dose Received by Visitors and Tourist Guides*. Sveučilište u Osijeku, Odjel za fiziku.
- [18] *Izvori radona u kući*; Dostupno na: <https://www.quebec.ca/en/homes-and-housing/healthy-living-environment/residential-radon> [15.kolovoza 2022.]
- [19] Koščak M. (2019). *Procjena godišnje efektivne doze u stambenom objektu u Donjem Miholjcu*. Diplomski rad. Osijek: Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku.
- [20] Poje Sovilj M., Miklavčić I., Šmit G., Stanić D., Radolić V. (2022). *Correlation between radon in water, radon in soli gas and indoor radon based on the extensive measurements*. Sveučilište u Osijeku, Odjel za fiziku.
- [21] Radolić V., Šimatović V., Miklavčić I. (2008). *Radon u vodi gradskih vodovoda u naseljima Osječko-baranjske županije*. Sveučilište u Osijeku, Odjel za fiziku.
- [22] Europska komisija. EUR-Lex - *Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies* (2001). Dostupno na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2001.344.01.0085.01.ENG [15. srpnja 2022.]

- [23] Vuković, S. (2017.) *Kalibracija tečnog scintilacionog detektora za merenje ^{222}Rn u vodi*. Diplomski rad. Novi Sad, Srbija: Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za Fiziku.
- [24] UNSCEAR 2000, *Sources and effects of ionizing radioation*. Dostupno na: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf [25.kolovoza 2022.]
- [25] Vuković S., et all. (2020). *Radon in the water*, 62/73. Dostupno na: <https://doisrpska.nub.rs/index.php/conterporarymaterials3-1/article/view/8011/7778> [21.srpnja 2022.]
- [26] Passo C. J., Cook G. T. *LSC Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry, A compilation of Theory and Methods*. Packard, Meriden, CT U.S.A.
- [27] Liquid Scintillation Counting, Professional Training Programs. ORAU.
- [28] L'Annunziata M. F. (2012). *Handbook of Radioactivity Analysis*. Academic Press, 3rd edition.
- [29] Scintilacijski detektori. Dostupno na: <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~bosnar/pfec/scintilator.pdf> [25. kolovoza 2022.]
- [30] Pavlačić A. (2018). *Usporedba metoda mjerenja koncentracija aktivnosti radona u vodi*. Diplomski rad. Osijek; Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku.
- [31] *QuantaSmart For The TriCarb Liquid Scintillation Analyzer Reference Manual*, PerkinElmer, Inc., 2004. [file:///C:/Users/Denis/Downloads/TriCarb%20Reference%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Denis/Downloads/TriCarb%20Reference%20(1).pdf)
- [32] TriCarb refrence [file:///C:/Users/Denis/Downloads/TriCarb%20Reference%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Denis/Downloads/TriCarb%20Reference%20(1).pdf)
- [33] Hahn B.P., Pia H. S. *Determination of Radon in Drinking Water by Liquid Scintillation Counting*. (1991). U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada.
- [34] *Quality Assurance Plan for Conducting Radon Measurements*. (2019). MDH Standard QA Plan V3.2.
- [35] Measurement of radon. (2014). International Atomic Energy Agency (IAEA). Dostupno na: https://radon.bg/wp-content/uploads/2020/08/Rovenska-Measurement_protocols_Sofia2014.pdf [28. kolovoza 2022.]

ŽIVOTOPIS

Sara Bencetić je rođena 30.04.1996. godine u Osijeku. Završila je osnovnu školu „Hrvatski sokol“ u Podravskim Podgajcima te nakon završetka osnovne škole upisuje Opću gimnaziju u Donjem Miholjcu. Po završetku srednje škole upisuje preddiplomski studij Fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku te stječe titulu prvostupnice fizike 2019. godine. Diplomski studij Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku upisuje akademske 2019./2020. godine.